

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E MATERIAIS – PPGE3M

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PIEZORESISTIVO DE UM COMPÓSITO
CIMENTÍCIO CONTENDO RESÍDUO DE LODO PROVENIENTE DO TRATAMENTO
DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA

Autor: Andriele dos Reis Araujo

Orientador: Prof.^a. Dra. Vania Caldas Sousa

Porto Alegre
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E MATERIAIS – PPGE3M

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PIEZORESISTIVO DE UM COMPÓSITO
CIMENTÍCIO CONTENDO RESÍDUO DE LODO PROVENIENTE DO TRATAMENTO
DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA

Nome do autor: Andriele dos Reis Araujo

Dissertação desenvolvida no Laboratório de Biomateriais e Cerâmicas Avançadas, dentro do Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Área de concentração: Ciência e tecnologia de Materiais.

Porto Alegre
2018

ESTA DISSERTAÇÃO FOI ANALISADA E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS E APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA ORIENTADORA E PELA BANCA EXAMINADORA DO CURSO DE PÓS- GRADUAÇÃO.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Vania Caldas Sousa

Aprovado em: 21/05/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dra. Camila Ferreira Escobar - IFRS

Prof. Dr. Felipe Antonio Lucca Sánchez - UNISINOS

Prof. Dr. Luciano Andreatta Carvalho da Costa – UERGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luis e Malzarete, por todo amor, carinho e incentivo, o apoio que sempre tive de vocês foi essencial para minha formação pessoal e profissional.

Ao meu companheiro Robernei, pela ajuda e apoio durante os meus estudos.

Aos meus irmãos pela amizade e carinho.

À minha orientadora, Vânia Sousa, pela dedicação e ajuda para a realização desse trabalho, e pelas palavras de amizade e incentivo. Ao professor José Jurado, pelos seus ensinamentos e contribuição a este trabalho.

Aos amigos e colegas do Labiomat, pelo apoio e pela ajuda nos momentos que precisei, em especial para Camila Escobar, que por muitas vezes disponibilizou do seu tempo para me ajudar com os equipamentos do laboratório.

Aos amigos, colegas e ex-professores pelo incentivo em meus estudos.

Ao PVC Ciência sem Fronteiras CNPQ 407418/2013-0.

A professora Feliciane Andrade Brehm/UNISINOS pela disponibilização do resíduo para estudo e a colega do Labiomat, Iara Fernandes.

A todos aquele que, direta ou indiretamente, propiciaram a realização desse trabalho.

RESUMO

Conhecer e estudar as propriedades do concreto e seus compósitos cimentícios, com e sem a incorporação de resíduos, é uma forma de propor melhorias na construção civil e contribuir com o desenvolvimento sustentável. Este trabalho propõe investigar o efeito da incorporação de um resíduo, como o lodo proveniente do tratamento de efluentes da indústria metal-mecânica, na piezoresistividade e no comportamento elétrico de um compósito cimentício. O lodo é um resíduo da indústria metal mecânica proveniente do tratamento de efluentes do processo de revestimento do aço. A piezoresistividade é uma propriedade elétrica que descreve a variação de resistência elétrica de alguns materiais quando submetidos a esforços e deformações mecânicas. Para esse estudo foram confeccionados corpos de prova cúbicos com uma mistura de cimento, areia e água onde foram adicionados diferentes percentuais de resíduo a ser comparado com a amostra de referência. O ensaio de piezoresistividade consistiu na aplicação de cargas de compressão que variaram de 0 a 2,1 kN e simultaneamente foram registradas as variações da resistência elétrica de cada amostra. A pesquisa tem caráter exploratório, portanto os ensaios realizados não tiveram temperatura e umidade controladas. As amostras com resíduo demonstraram maior potencial energético e maior piezoresistividade. O corpo de prova de referência apresentou valores de resistividade menor do que as amostras contendo lodo, na ordem de $5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ e permanece praticamente constante quanto maior a pressão aplicada, ocorreu uma redução de apenas 1,73% na resistividade elétrica. Por outro lado, as amostras contendo lodo incorporado apresentam inicialmente resistividade entre $0,9 \times 10^7$ a $2,7 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ tendendo a diminuir drasticamente, 27 a 55% com a pressão aplicada, principalmente nas amostras contendo acima de 15 % de lodo. Dentre as amostras analisadas, a que possui 5% de resíduo, apresentou potencial elétrico na faixa de $2,48 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ a $5,85 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2$ nas aplicação de cargas de 90 a 1600 kPa. Logo, uma elevação de 135 %. Portanto, essa amostra foi a que demonstrou ser a mais ideal para a conversão energética por apresentar melhor resposta elétrica aliado à sua resistência mecânica.

Palavras-chave: Piezoresistividade; Lodo; Resíduo.

ABSTRACT

Analysis of the piezoresistive behavior of concrete containing residual sludge from wastewater treatment of metal-mechanical industry abstract knowing and studying the properties of concrete with and without the incorporation of waste is one way to propose improvements in construction and contribute to sustainable development. This paper proposes to investigate the effect of incorporation of waste, as the sludge from wastewater treatment of the metal-mechanics industry, on piezoresistividade in a cementitious composite. The waste is a residual metal mechanics industry from the wastewater treatment of the coating process of steel. The piezoresistividade is an electrical property that describes the variation of electrical resistance of some materials when subjected to forces and mechanical deformations. For this study were prepared specimens cubic with a mixture of cement, sand and water were added different percentages of residue to be compared with the reference sample. The piezoresistividade test consisted in the application of compression charges that ranged from 0 to 2.1 kN and simultaneously we recorded the changes in electrical resistance of each sample. The research is exploratory character, so the tests did not have temperature and humidity controlled. The samples showed greater energy potential residue with and greater piezoresistividade. The body of evidence introduced reference values of resistivity less than the samples containing mud, in the order of $5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ remains practically constant and the higher the applied pressure, a reduction of only 1.73% on electrical resistivity. On the other hand, samples containing embedded sludge present initially between resistivity $0.9 \times 2.7 \times 10^7$ to $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ tending to decrease dramatically, 27 to 55% with the pressure applied, especially in samples containing up to 15%. One of the samples analysed that has 5% of waste was the one that proved to be the most ideal for energy conversion, due to your electrical response in the tests your ally mechanical resistance.

Key-words: Piezoresitivity; sludge; waste.

PUBLICAÇÕES

ARAUJO, A. R.; GUIMARAES, C. R.; ESCOBAR, C. F.; SCARABELOT, E. G.; JURADO, J. R.; SOUSA, V. C.. Análise do Comportamento Piezoresistivo da Matriz de Concreto Contendo Resíduo de Lodo de Fosfatização. In: 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2016, Águas de Lindoia. Anais do 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo: Associação Brasileira de Cerâmica, 2016. v.1. p.1561 – 1570.

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
PUBLICAÇÕES	7
SUMÁRIO	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	13
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1.OBJETIVOS	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.CIMENTOS.....	18
2.2.CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	23
2.2.1. Compósitos cimentícios e concreto com adição de resíduos	24
2.3.PIEZO-RESISTIVIDADE.....	26
2.3.1. Piezoresistividade de concreto e compósitos cimentícios	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1.MATERIAIS	34
3.1.1. Cimento Portland.....	34
3.1.2. Agregados	34
3.1.3. Água	34
3.1.4. Resíduo incorporado	35
3.2.MÉTODO DE PREPARAÇÃO E CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS	38
3.3.CARACTERIZAÇÃO.....	41
3.3.1.Densidade aparente, porosidade e absorção de água	41
3.3.2. Microscopia ótica	42

3.3.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)	43
3.2.4 Caracterização Piezoelétrica dos Materiais	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS	51
4.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	61
4.3. EFEITO DA ADIÇÃO DO RESÍDUO SOBRE A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	62
4.4. COMPORTAMENTO ELÉTRICO	63
5. CONCLUSÕES	72
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Formação da Estrutura do Cimento Pozzolana. Fonte: Ashby e Jones, 2007.....	20
Figura 2.2: Processo de mistura e pega dos componentes do cimento Portland. Fonte: Ashby e Jones, 2007.....	21
Figura 2.3: Processo de endurecimento, formação dos bastões de gel de toboromita. Fonte: Ashby e Jones, 2007.....	22
Figura 2.4: Corpos de prova rompidos aos 28 dias de cura. 2.4a) CAD 2.4b) CAD com borracha. Fonte: Martins, 2005.....	25
Figura 2.5: Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão. Fonte: Schiessl, 1987.....	28
Figura 2.6: Circuito de referência para determinação da resistência elétrica das amostras. Fonte: Han e Ou, 2007.....	29
Figura 2.7: Piezoresistividade elétrica em % pela compressão mecânica. Fonte: Han e Ou, 2007.....	30
Figura 2.8: Dispositivos com contatos elétricos. Fonte: Fernandes, 2016.....	31
Figura 3.1: Fluxograma de delineamento da pesquisa. Fonte: Autor, 2018.....	33
Figura 3.2: Lodo proveniente do tratamento de efluentes da indústria metal mecânica. Fonte: Autor, 2018.....	35
Figura 3.3: Difractograma de Raio X do lodo. Fonte: Mantovani, 2014.....	37
Figura 3.4: Distribuição granulométrica do lodo. Fonte: Mantovani, 2014.....	38
Figura 3.5: Etapas preparação do compósito cimentício de referência. 3.5a) Cimento CP IV + areia fina seca e peneirada. 3.5b) Mistura manual dos componentes secos: cimento e areia. 3.5c) Adição de água de acordo com o teor pré-estabelecido, mistura manual. Fonte: Autor, 2016.....	39
Figura 3.6: Corpos de prova. 3.6a) Algumas amostras recém moldadas e identificadas. 3.6b) Corpo de prova desmoldado com dimensão aproximada de 8 cm. Fonte: Autor, 2016.....	41
Figura 3.7: Microscópio Ótico Leica, software LAS EZ. Fonte: Autor, 2018.....	43
Figura 3.8: Amostras preparadas e metalizadas para o MEV. Fonte: Autor, 2018.....	44

Figura 3.9: Esquema circuito, método de quatro pontas. Fonte: Autor, 2018.....	45
Figura 3.10: Corpos de prova com eletrodos de prata. Fonte: Autor, 2018.....	46
Figura 3.11: Multímetro Digital Tektronix DMM4040. Fonte: Autor, 2018.....	47
Figura 3.12: Instron 3369. Fonte: Autor, 2018.....	48
Figura 4.1: Microscopia óptica nas amostras de referência e com lodo incorporado. 4.1a) Amostra referência. 4.1b) Amostra com 5% de lodo. 4.1c) Amostra com 15% de lodo. 4.1d) Amostra com 25% de lodo. Fonte: Autor, 2018.....	51
Figura 4.2: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra de referência em diferentes aumentos. Fonte: Autor, 2018.....	52
Figura 4.3: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra com 5% lodo incorporado. Fonte: Autor, 2018.....	53
Figura 4.4: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra com 15% lodo incorporado. Fonte: Autor, 2018.....	54
Figura 4.5: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra com 25% lodo incorporado. Fonte: Autor, 2018.....	55
Figura 4.6: Análise EDS amostra de Referência. Fonte: Autor, 2018.....	57
Figura 4.7: Análise EDS amostra com 5% de resíduo incorporado. Fonte: Autor, 2018.....	58
Figura 4.8: Análise EDS amostra com 15% de resíduo incorporado. Fonte: Autor, 2018.....	59
Figura 4.9: Análise EDS amostra com 25% de resíduo incorporado. Fonte: Autor, 2018.....	60
Figura 4.10: Resistência elétrica em relação a pressão mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.....	63
Figura 4.11: Resistividade elétrica em relação a pressão mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.....	65
Figura 4.12: Piezoresistividade elétrica em relação a pressão mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.....	66
Figura 4.13: Condutividade elétrica das amostras em relação a pressão mecânica. Fonte: Autor, 2018.....	68
Figura 4.14: Potência elétrica das amostras em relação a pressão mecânica. Fonte: Autor, 2018.....	69

Figura 4.15: Potência elétrica/ Equação linear equivalente. Fonte: Autor, 2018.....	70
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Nomenclatura reduzida elementos do cimento. Fonte: Ashby e Jones, 2007.....	17
Tabela 3.1: Caracterização química do lodo. Fonte: Brehm, 2013.....	34
Tabela 3.2: Composições obtidas. Fonte: Autor, 2018.....	38
Tabela 4.1. Elementos químicos observados na superfície das amostras e seus percentuais. Fonte: Autor, 2018.....	53
Tabela 4.2. Absorção de água, densidade e porosidade aparente das amostras com e sem incorporação do lodo. Fonte: Autor, 2018.....	56
Tabela 4.3: Tensão de ruptura por compressão. Fonte: Autor, 2018.....	57
Tabela 4.4: Medidas elétricas das amostras de acordo com a carga mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.....	61
Tabela 4.5: Equações potência elétrica. Fonte: Autor, 2018.....	64

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Alumina (Al_2O_3)
AA - água absorvida
a/c – água /cimento
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
C – Cal (CaO)
CAD – Concreto de Alto Desempenho
CP – Concreto Portland
DA - densidade aparente
DMAE- Departamento Municipal de Água e Esgoto
H – Água (H_2O)
I – Corrente Elétrica
L – Distância entre Eletrodos
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
Mi - massa (g) do corpo de prova imerso em água
Ms - massa do corpo de prova seco 110°C
Mu - massa (g) do corpo de prova úmido
NBR – Norma Brasileira
NTC – Nanotubos de Carbono
PA - Porosidade Aparente
R – Resistência Elétrica
s – Área da amostra
S – Sílica (SiO_2)
V – Tensão Elétrica
 σ – Condutividade Elétrica
 ρ - resistividade
 ρ_L - densidade do meio líquido

1. INTRODUÇÃO

São diversos os tipos ou qualidades de cimentos empregados na construção civil, fabricados para aplicações usuais ou específicas. Pode-se obter também os cimentos onde são incorporados subprodutos, como escória de alto-forno. Em geral, todos os tipos de cimentos têm em seus componentes básicos os mesmos elementos: Cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e Óxido de ferro (Fe_2O_3), o que os diferencia são as proporções que esses elementos se distribuem.

O processo de fabricação do cimento consiste na aglutinação dos componentes por aquecimento da mistura até a sua sinterização, formando então o clínquer. Após essa etapa a mistura é moída para que as partículas atinjam dimensões adequadas; e são feitas as adições para assim produzir os diferentes tipos de cimento encontrados comercialmente.

O cimento Portland é um cimento hidráulico pois a sua dureza se desenvolve através de reações químicas com a água, usado principalmente em argamassa e concreto para agregar numa massa coesa, agregados de partículas inertes, esses são considerados materiais compósitos.

A preocupação com a destinação dos resíduos gerados pelo ser humano é um tema de extrema importância, além do grande volume de descartes gerados diariamente, tem-se a preocupação com a contaminação que esses materiais podem ocasionar na natureza. O reaproveitamento de resíduos de diversas fontes é comum desde as sociedades antigas, porém em alguns casos a incorporação desses descartes era realizada de maneira empírica. Observa-se a um bom tempo o desenvolvimento de pesquisas com a preocupação de determinar a influência da adição de resíduos da construção civil, mineração, indústria metal mecânica, nas propriedades dos materiais, principalmente as propriedades mecânicas. Em relação ao cimento e ao concreto especificamente, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos tendo em vista estudar as propriedades elétricas de concretos com e sem resíduos. Vale a pena ressaltar que o cimento apresenta estrutura que favorece o desenvolvimento de piezoresistividade e piezoelectricidade. A piezoresistividade pode ser definida como uma propriedade que

descreve a mudança da resistência elétrica dos materiais quando submetidos a esforços mecânicos. Os sensores piezoresistivos são comuns no nosso dia a dia, em aparelhos como microfones ou nos airbags dos automóveis. É importante ressaltar que o efeito piezoresistivo é distinto do efeito piezoelétrico, os materiais piezoresistivos sofrem uma mudança na sua resistência elétrica ao serem pressionados ou deformados, enquanto que os materiais piezoelétricos geram uma tensão elétrica após a mesma solicitação. O concreto pode apresentar resistividade de aproximadamente $10^{13}\Omega\text{cm}$, no entanto, a adição de materiais condutores como fibras e pós de carbono, pós de grafite, fibra de aço entre outros materiais condutores podem alterar a resistividade do concreto. Han e Ou, 2007, realizaram um estudo referente ao comportamento piezoresistivo em uma base de cimento com fibra de carbono e negro fumo avaliando a sua viabilidade de uso como um sensor. Por outro lado, Kim et al., 2014, mediram a piezoresistividade em argamassa com adição de nanotubos de carbono observando uma redução acentuada na resistividade da argamassa com a adição dos nanotubos. Não foram encontrados trabalhos determinando a piezoresistividade e potencial elétrico de concretos ou compósitos cimentícios contendo resíduos da indústria metal-mecânica. Portanto, neste trabalho, pretende-se avaliar o efeito da adição de um resíduo proveniente da indústria metal-mecânica contendo alto teor de elementos químicos como o ferro, sobre seu comportamento elétrico, como piezoresistividade e potencial elétrico.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da adição de um resíduo proveniente da indústria metal-mecânica contendo alto teor de ferro em um cimento Portland, sobre seu comportamento elétrico, como piezoresistividade e potencial elétrico, visando desenvolver dispositivos com propriedades piezoresistivas para futuras aplicações como sensores de monitoramento de esforços mecânicos em estruturas de concreto.

1.1.1. Objetivos específicos

1. Estabelecer um procedimento adequado para medir a piezoresistividade do cimento;
2. Confecção de corpos de prova de tamanho adequado para realização dos ensaios;
3. Caracterização elétrica, física e microestrutural do cimento com e sem resíduo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

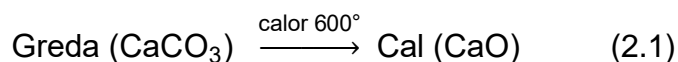
Esse capítulo apresenta toda a revisão bibliográfica necessária para a elaboração deste trabalho. Conceitua-se temas relacionados a compósitos cimentícios, suas tecnologias, regulamentações, analisando o reaproveitamento de resíduos de modo geral, bem como sua incorporação em compósitos cimentícios. Dentre as propriedades do cimento, estuda-se o comportamento elétrico e suas alterações na presença de resíduos.

2.1. CIMENTOS

Nesse item serão apresentados alguns tipos de cimentos utilizados na construção civil. O concreto é o principal composto à base de cimento, de modo geral é uma mistura particulada de pedra e areia, que se mantém unida por um adesivo ou pasta de cimento.

O cimento cal produzido principalmente pelos romanos e povos antigos era misturado com cinza vulcânica para obtenção de uma argamassa de cal, seu sucesso pode ser constatado a julgar pela quantidade de edifícios romanos ainda em pé 2000 anos depois. Sua nomenclatura, cimento pozzolana, se deve à cidade de Pozzuoli, perto de Nápoles, de onde provinham suas cinzas e que ainda permanece em alarmante atividade vulcânica (ASHBY E JONES, 2007).

A fabricação do cimento pozzolana consiste em aquecer a greda, uma rocha sedimentar porosa constituída essencialmente por carbonato de cálcio (CaCO_3), a uma baixa temperatura, possível de se obter em fornos simples, para obtenção da cal, conforme demonstrada na Equação 2.1.



Ao misturar a cal com água e cinza vulcânica pode-se utiliza-la para unir pedras, tijolos e até madeira. Nesse processo a água reage com a cal, obtendo-se o $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

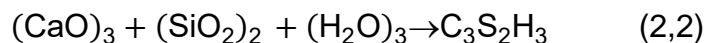
Durante essa transformação ocorre uma reação superficial com a cinza, que contém SiO_2 , sendo obtido o gel de tobomorita $(\text{CaO})_3(\text{SiO}_2)_2(\text{H}_2\text{O})_3$ como resultado é adquirido uma forte ligação. Nem todas as cinzas vulcânicas podem ser utilizadas nessa aplicação, apenas algumas possuem uma superfície ativa capaz de promover essa ligação, porém são relativamente fáceis de se obter.

Uma nomenclatura simplificada foi estabelecida para compreender a química dos cimentos, conforme pode-se observar na Tabela 2.1. Nesta tabela constam os quatro ingredientes do cimento com suas respectivas nomenclaturas.

Nomenclatura	Elementos químicos	Nomenclatura abreviada
Cal	CaO	C
Alumina	Al_2O_3	A
Sílica	SiO_2	S
Água	H_2O	H

Tabela 2.1: Nomenclatura reduzida elementos do cimento. Fonte: Ashby e Jones, 2007.

O produto resultante da reação entre estes componentes, listados na Tabela 2.1, consiste do Gel de tobomorita, conforme reação descrita na equação 2.2.



De acordo com a terminologia apresentada o cimento pozzolana é descrito como C, misturado com cinza vulcânica que é constituída em sua superfície por S e água (H). Durante o processo de pega desse cimento ocorrem reações, as quais são representadas pelas Equações 2.3 e 2.4. O gel de tobomorita ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) une a cal hidratada (CH) às partículas de pozzolana. A Figura 1 ilustra a formação da estrutura desse cimento após suas reações.



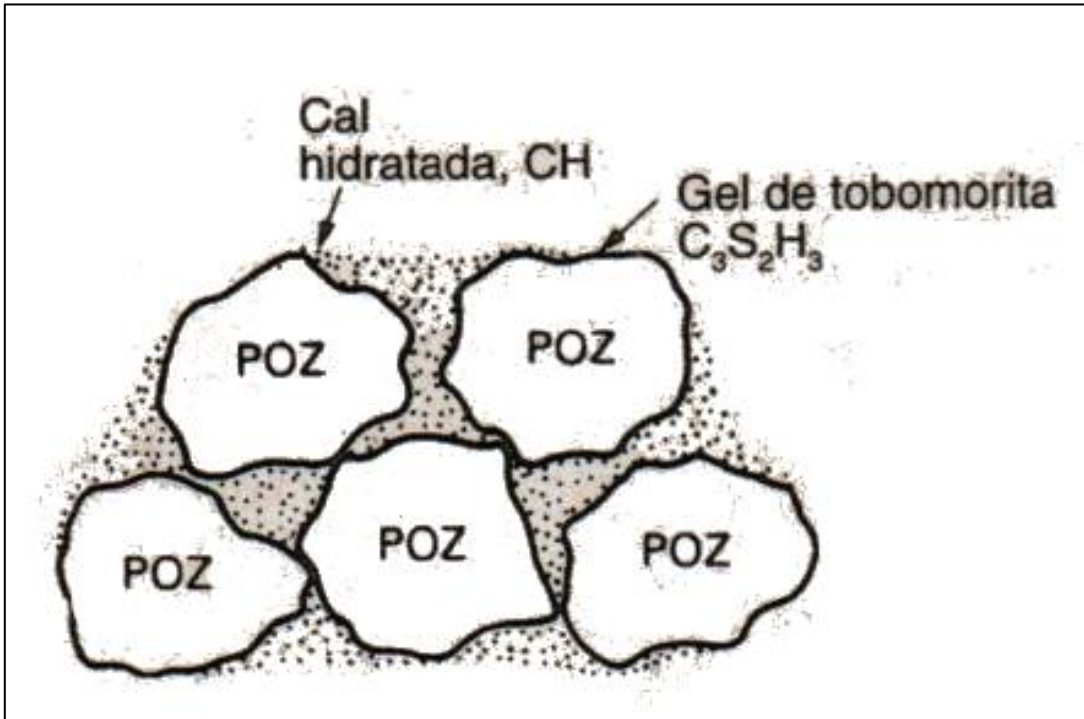
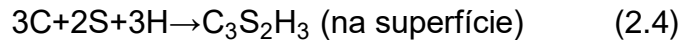
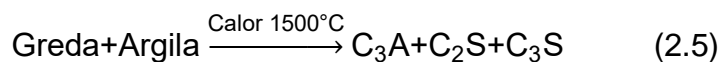


Figura 2.1: Formação da Estrutura do Cimento Pozzolana. Fonte: Ashby e Jones, 2007.

No começo do século XIX a indústria da construção civil deu um salto tecnológico quando foi obtida a patente para um cimento de qualidade superior por um empreendedor de Leeds, Jo Aspdin. O cimento Portland recebeu esse nome devido a sua semelhança com um calcário branco proveniente da ilha Inglesa de mesmo nome. Sua preparação requer um controle tecnológico superior ao do cimento pozzolana, deve haver uma queima da mistura controlada de greda ($CaCO_3$) e argila (S_2AH_2) em um forno, a temperatura necessária é de $1500^\circ C$ que requer materiais e combustíveis especiais para o forno. A Equação 2.5 representa o produto resultante dessa queima (Ashby e Jones, 2007).



O endurecimento dos cimentos ocorre por reação e não por secagem; e até que atinjam a dureza total é importante mantê-los úmidos. De maneira simplificada, ocorrem dois grupos de reações durante a hidratação do cimento Portland. A primeira reação, a hidratação de C_3A , promove a pega do cimento e ocorre nas primeiras quatro horas, conforme ilustrada na Equação 2.6. O processo de mistura e pega do cimento Portland ocorre como observado na Figura 2 nessa primeira etapa.

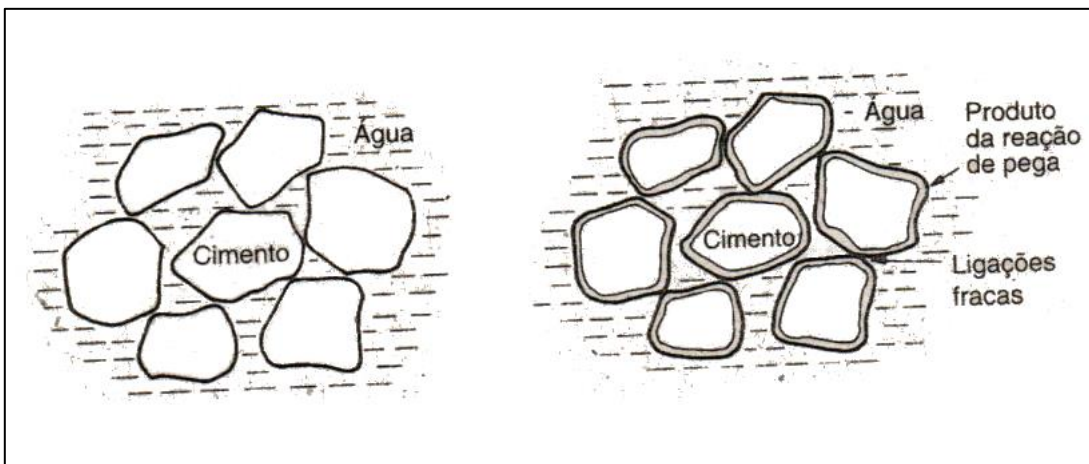
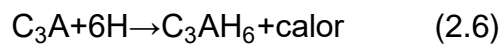
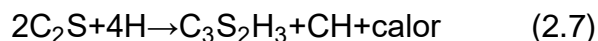


Figura 2.2: Processo de mistura e pega dos componentes do cimento Portland. Fonte: Ashby e Jones, 2007.

A segunda etapa é mais lenta, Equações 2.7 e 2.8, causa o endurecimento do cimento. Ela começa em torno de 10 horas e leva 100 dias ou mais para chegar ao final. Nesse período ocorre a hidratação de C_2S e C_3S , a resultante desse processo é a formação do gel de tobomorita, principal material de ligação que ocupa 70% da estrutura. A Figura 2.3 ilustra o processo de endurecimento do concreto onde ocorre a formação espinhos constituídos por gel de tobomorita.



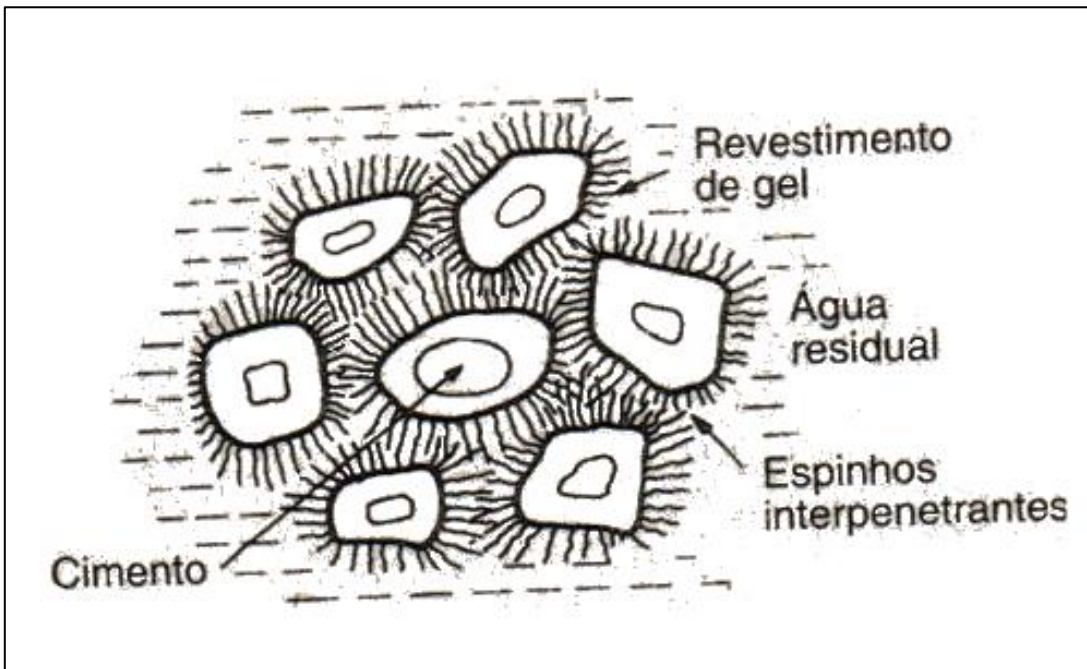
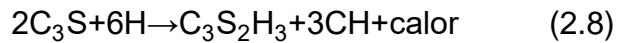
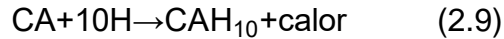


Figura 2.3: Processo de endurecimento, formação dos bastões de gel de toboromita. Fonte: Ashby e Jones, 2007

No cimento Portland o gel de toboromita não se deposita apenas na superfície dos grãos como na pozzolana, ele desenvolve protuberâncias que formam bastões finos que se irradiam como espinhos a partir dos grãos individuais de cimento. Esses espinhos são o $C_3S_2H_3$ do segundo conjunto de reações e enquanto o processo de hidratação segue, os espinhos crescem e ocupam a região entre os grãos e a superfície de outros materiais, formando uma rede intertravada desses bastões. Por esse motivo o cimento Portland apresenta uma resistência mecânica maior que a pozzolana pois esse fenômeno de formação dos espinhos favorece a formação de uma massa mais rígida após o processo de endurecimento.

O cimento de alto teor de alumina é um material recente e ainda pouco difundido, possui características químicas bem diferentes dos outros cimentos citados, sua composição é basicamente de CA, cal e alumina, nomenclatura referente a Tabela 2.1. O grande proveito do uso desse cimento é sua alta taxa de endurecimento em relação

ao cimento Portland, a resistência mecânica atingida em um dia se compara a um mês do seu concorrente.



A Equação 2.9 demonstra a reação de endurecimento do cimento de alto teor de alumina. Um dos problemas apresentados é a perda da sua resistência mecânica a longo prazo, dependendo das condições de temperatura e ambiente, principalmente em locais quentes e úmidos, o material pode se deteriorar rapidamente. Essa deterioração se deve a conversão do CAH_{10} para o mais estável C_3AH_6 , tornando a estrutura mais porosa e causando prejuízos as suas propriedades mecânicas.

2.2. CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

O concreto é um material compósito feito de água, cimento e agregados, tipo cascalho. Por outro lado o cimento é constituído por um pó muito fino essencialmente de calcário e outros minerais, que atua como agente de ligação para manter o concreto em bloco. De um modo geral o concreto não pode ser feito sem o cimento, exceto alguns tipos como o concreto asfáltico.

A resistência mecânica ótima e a operacionalidade de um concreto depende das proporções corretas dos seus componentes, por vezes são adicionados aditivos cristalizadores, retardadores ou aceleradores de pega. Como a maioria dos materiais cerâmicos, o concreto tem baixa resistência a tração aproximadamente 10 a 15 vezes menor que a resistência a compressão (CALLISTER, 2002).

É essencial o controle dos agregados, esses precisam ter uma boa distribuição granulométrica, suas superfícies devem estar limpas e isentas de argilas e sedimentos. A natureza desses materiais deve ser levada em consideração, as jazidas de extração determinaram suas propriedades que são de extrema importância no produto final, o concreto (CALLISTER, 2002).

O concreto de cimento Portland é considerado um dos materiais mais importante na construção civil. Tem como vantagem em sua utilização a versatilidade em seu preparo, moldagem e processo de endurecimento, inclusive quando submerso em água. Como função estrutural possui suas limitações, apesar de sua grande resistência a compressão mecânica, o concreto por si não reage bem a forças de trações (ASHBY E JONES, 2007).

2.2.1. Compósitos cimentícios e concreto com adição de resíduos

A preocupação com a destinação de resíduos é um tema de muitos estudos, além do grande volume de alguns descartes há também a preocupação quanto a poluição e desequilíbrio do meio ambiente. Por ser um material utilizado em grande volume, o concreto é uma excelente alternativa para reutilização de diversos resíduos, muitos pesquisadores desenvolvem trabalhos avaliando o efeito da adição desses materiais de diversas fontes incorporados no concreto principalmente sobre as propriedades mecânicas.

Gonçalves, 2000, em seu trabalho, avalia a reutilização de concreto como agregado na dosagem de concreto estrutural. Cita também a necessidade de conhecer as propriedades desse concreto reaproveitado, pois muitas vezes é tratado como um material de baixa qualidade pelo desconhecimento de suas propriedades. Apesar de uma pequena perda de resistência mecânica em relação ao concreto de referência estudado, o autor conclui sugerindo o grande potencial desses resíduos de concreto, além dos benefícios econômicos.

Martins, 2005, faz uma análise da adição de resíduos de borracha de pneu em concretos de alto desempenho (CAD) com o objetivo de dar uma destinação a pneus inservíveis e melhorar algumas propriedades do CAD como a tenacidade. Percebeu em seus ensaios uma diminuição na resistência à compressão, porém o resultado em relação a ruptura foi satisfatório, como mostrado na Figura 2.4a o corpo de prova de concreto de alto desempenho com sua ruptura típica e a Figura 2.4b o CAD com borracha e rompido, ambos após 28 dias de cura.



Figura 2.4: Corpos de prova rompidos aos 28 dias de cura. 2.4a) CAD 2.4b) CAD com borracha.
Fonte: Martins, 2005.

O trabalho de Mantovani, 2014, estuda a influência da adição de diferentes percentuais de dois materiais no concreto branco, a cinza volante com o objetivo de melhorar as propriedades do concreto e substituir parte do volume de cimento utilizado na fabricação; e um lodo que é resíduo da indústria metal mecânica, que contém óxido de ferro em sua composição, implementado como pigmento para obter um concreto cromático. Seus resultados apresentam benefícios na adição de cinza volante em relação as propriedades analisadas e representam um ganho ambiental, uma vez que seu uso possibilita a redução do consumo de cimento sem causar perdas em suas características. Quanto ao uso do lodo, observou uma redução em sua resistência à compressão, porém as características de pigmentação foram satisfatórias, pois apesar de apresentar uma coloração menos intensa que o pigmento comercial usado como comparativo, as amostras pigmentadas com lodo demonstraram uma estabilidade na matriz cimentícia, ou seja, obtiveram valores de variação de cor semelhantes.

Nos trabalhos relacionados a influência da adição de resíduo nas propriedades mecânicas pouca atenção tem se dado a comportamento elétrico principalmente

piezoresistividade, alteração do comportamento, pela adição de resíduos. No próximo item serão abordados alguns trabalhos relacionados.

2.3. PIEZO-RESISTIVIDADE

A resistividade do material pode ser utilizada para detectar a variação ou a presença de diversas grandezas, como campo magnético, a pressão ou aceleração, certos agentes químicos como monóxido de carbono, fumo de tabaco, etc (KAKIMOTO, 2013).

As piezoresistências são um conjunto de sensores resistivos de grande utilidade prática. A piezo-resistividade se caracteriza pela dependência da resistividade elétrica com a deformação mecânica. A variação da mobilidade e da densidade de cargas livres nos materiais são, entre outras, as causas desta propriedade nos materiais, sendo que a densidade de cargas livres é devida à dependência da amplitude da banda proibida com o esforço mecânico. Essa propriedade é mais notória nos semicondutores como o silício e o germânio, apesar de ser comum a todos os materiais, no caso desses o coeficiente de variação da resistência elétrica é negativo (KAKIMOTO, 2013).

Microfone e detectores de aceleração, como airbag dos automóveis e sensores de fluxo em dutos de líquidos ou gases, utilizam materiais piezo-resistivos.

2.3.1. Piezoresistividade de concreto e compósitos cimentícios

Pode-se definir a resistividade elétrica no concreto e compósitos cimentícios como a propriedade que caracteriza a dificuldade de movimento dos íons, alguns autores denominam também como resistência específica (LÜBERK, 2008).

Segundo Helene, 1993, o teor de umidade e a temperatura do concreto tem influência direta e proporcionalmente inversa na resistência elétrica do material. Fatores como a microestrutura da pasta, volume e distribuição dos poros, e fatores externos, como a umidade, concentração de sais e temperatura atuam na resistividade elétrica (HUNKELER, 1996 et al ABREU, 1998).

A resistividade do concreto tipicamente varia entre 10 e 10^5 ohm.m, sendo seus valores influenciados diretamente pela composição do concreto. Geralmente concretos com altas relações água/cimento e sem adições, de elementos retardantes de cura ou plastificantes, têm baixa resistividade elétrica. Adições de cinza volante, escória de alto forno ou sílica ativa, normalmente aumentam a resistividade elétrica no concreto (ABREU, 1998).

Considerado um material compósito, o concreto possui vários tamanhos de agregados e partículas, embebidas em uma pasta de cimento. A resistividade elétrica das partículas, da matriz e do volume relativos dos materiais têm influência direta na resistência elétrica do compósito final (MONFORE, 1968 et al ABREU, 1998).

A Figura 2.5 ilustra a forma que os fatores que compõe o concreto agem nas propriedades químicas ou físicas do mesmo, influenciando em sua condutividade elétrica, consequentemente, a sua resistividade elétrica.

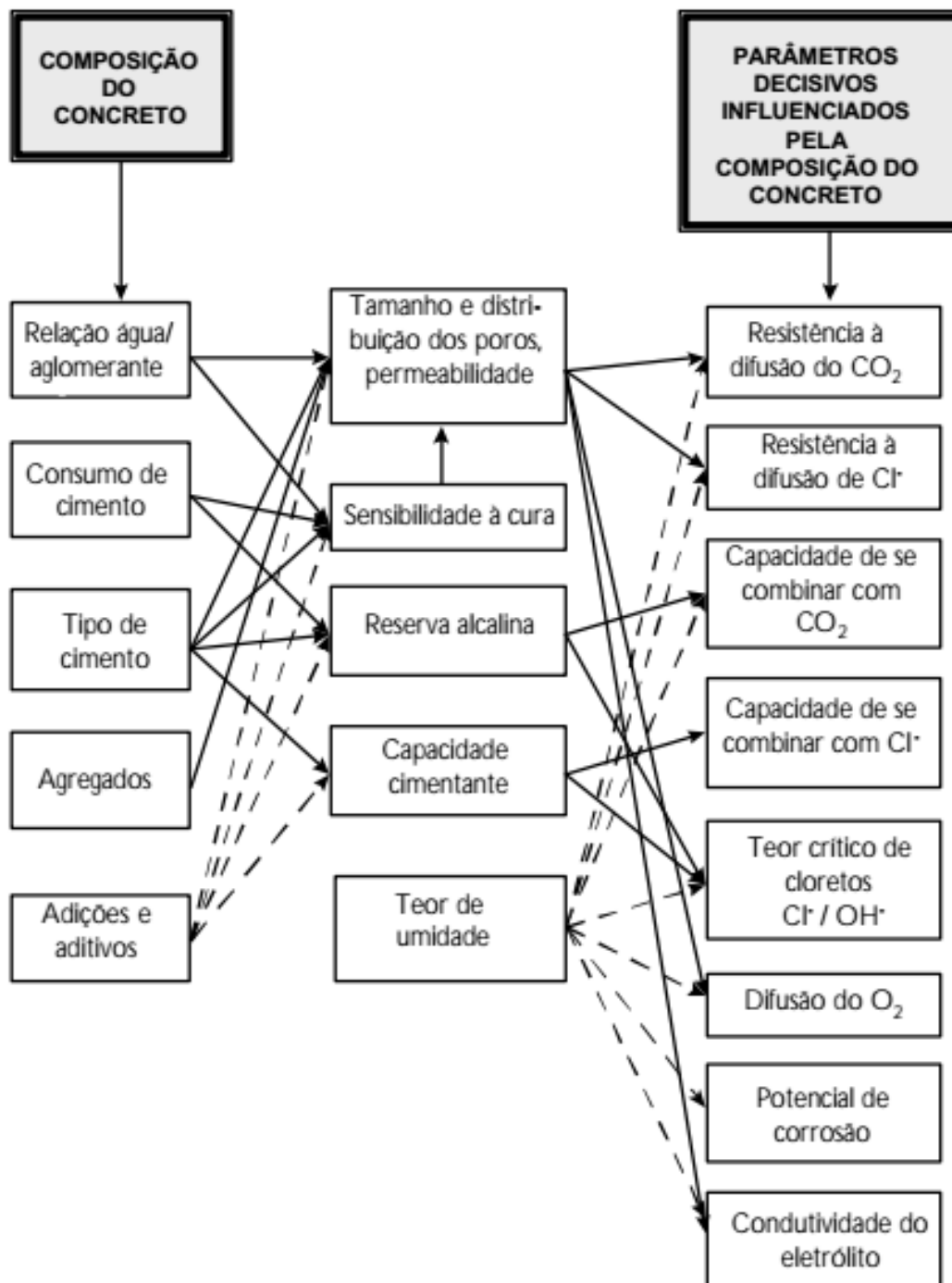


Figura 2.5: Influência da composição do concreto em parâmetros que governam a proteção da armadura contra a corrosão. Fonte: Schiessl, 1987.

A resistividade elétrica influencia de forma inversamente proporcional no que diz respeito a taxa de corrosão das armaduras no concreto armado, devido a taxa de transporte iônico presente na resistência elétrica do eletrólito, salvo em situação de saturação ou quando os valores de resistividade são muito altos (ABREU,1998).

Han e Ou, 2007, realizaram um estudo do comportamento piezoresistivo em uma base de cimento com a adição de fibra de carbono e negro de fumo, e sua viabilidade de uso como um sensor. Através de conectores embutidos nos corpos de prova, Figura 2.6, montaram um circuito medindo a resistência do material conforme a variação da carga de compressão, a partir desses dados determinou a resistividade e a piezoresistividade das amostras.

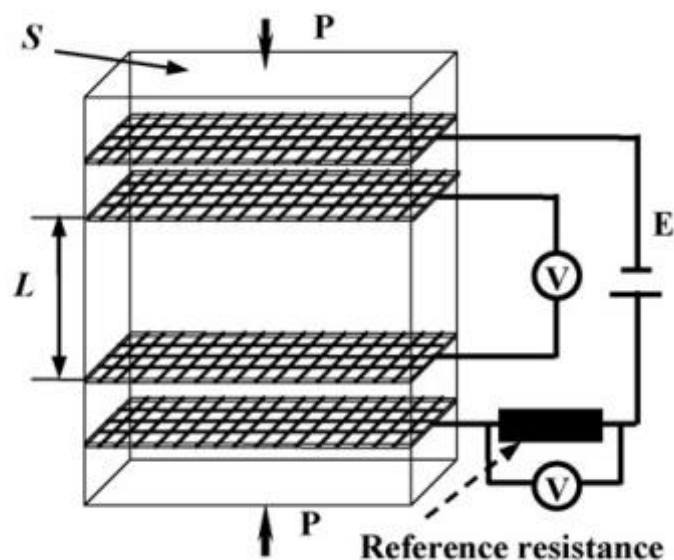


Figura 2.6: Circuito de referência para determinação da resistência elétrica das amostras. Fonte: Han e Ou, 2007.

Não houve comparativo com amostras sem os aditivos, porém foi possível observar um comportamento tendendo ao linear e elástico, conforme ilustrado no gráfico da Figura 2.7. No que diz respeito a piezoresistividade do material, foram realizados testes com carga mecânica única e cargas cíclicas. Os autores concluem que o sensor desenvolvido pode ser usado como uma das alternativas para monitorar a tensão/deformação compressiva das estruturas de concreto (Han e Ou, 2007).

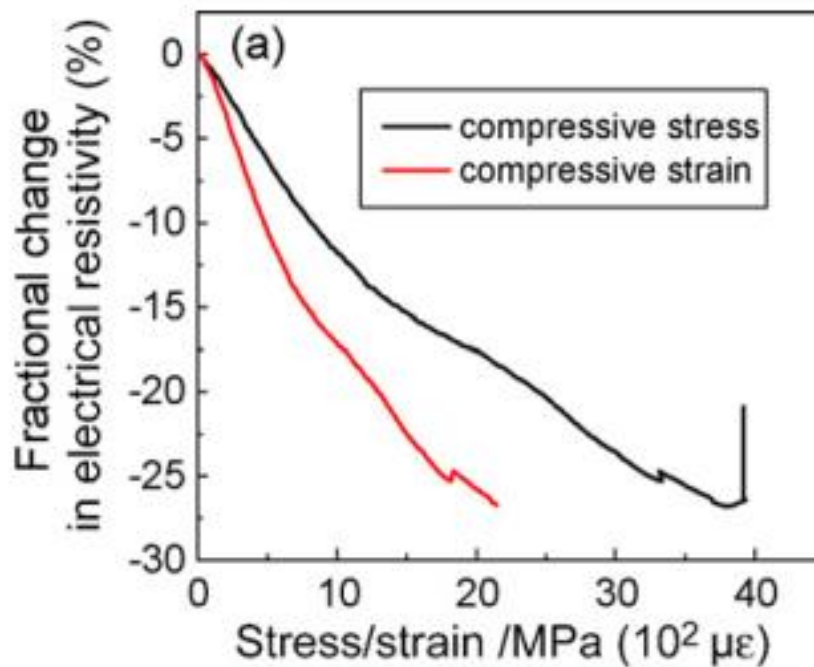


Figura 2.7: Piezoresistividade elétrica em % pela compressão mecânica. Fonte: Han e Ou, 2007.

Por outro lado, Kim et al., 2014, avaliaram a sensibilidade da piezoresistividade em argamassa com adição de nanotubos de carbono (NTC). O objetivo do estudo foi investigar a sensibilidade piezoresistiva e estabilidade de compósitos de argamassa NTC / cimento com baixa relação água-cimento.

A variação da resistência elétrica inicial destes compósitos de argamassa NTC / cimento, induzidos pelo teor de umidade, diminuiram ou foi mesmo completamente eliminada, diminuindo o teor água/cimento. Com a diminuição da relação água/cimento os autores observaram que tanto a estabilidade da piezoresistividade, sob carga cíclica, como sua sensibilidade com o passar dos ciclos de carregamento não foi satisfatória. De acordo com os pesquisadores para que a utilização destes compósitos seja efetiva, novos estudos devem ser realizados com o intuito de avaliar o desempenho piezoresistivo, a longo prazo, destes materiais (KIM et al., 2014).

Fernandes, 2016, adicionou dois materiais piezoresistivos, nanotubos de carbono (NTC) e polímero de polianilina (Pani), a amostras de cimento do tipo Portland, com o objetivo de fabricar dispositivos sensores de esforços mecânicos a serem incorporados

em estruturas de concreto. Os dispositivos, ilustrados na Figura 2.8, foram caracterizados através do ensaio de espectroscopia de impedância para determinação de suas resistências elétricas.

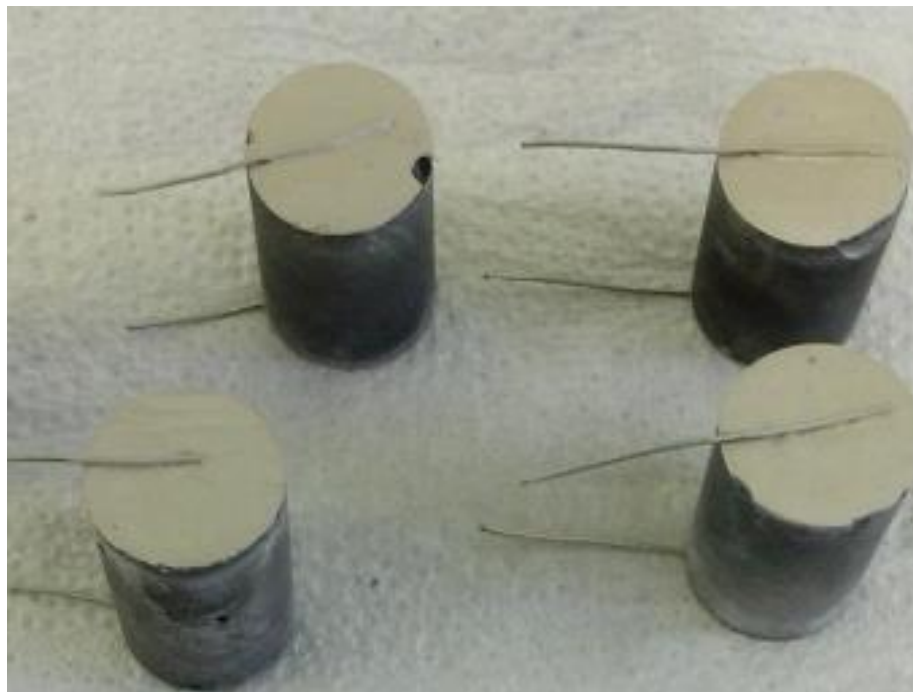


Figura 2.8: Dispositivos com contatos elétricos. Fonte: Fernandes, 2016.

Para realizar os testes de piezoresistividade com o aumento da pressão em diferentes idades de cura, os dispositivos foram inseridos em corpos de prova constituídos de argamassa de cimento. O autor observou que o aumento da pressão mecânica sobre os dispositivos resultou em uma considerável variação da resistência elétrica dos mesmos. Conclui que é possível o uso destes dispositivos como sensores para monitorar os esforços mecânicos em estruturas de concreto (FERNANDES, 2016).

O estudo de Loamrat et al, 2014, avaliou a resistividade elétrica e a resistência à compressão de sensores de base cimentícia, adicionando na mistura diferentes percentuais de fibra de carbono e pó de grafite, além disso, foram confeccionados corpos de prova com três razões de água para ligante. Durante o processo de cura, até os 28 dias após a desmoldagem, a resistividade foi medida sem carregamento mecânico, passado esse período realizou-se o ensaio de compressão aliado as medidas de

resistividade. Em deformações compressivas menores que 0,005, todos os sensores forneceram boas respostas em termos de piezoresistividade.

O trabalho de Billig, 2013, investigou as propriedades de compósitos cimentícios reforçados com nanotubos de carbono (NTC) com objetivo de propor a sua aplicação como sensores de estruturas de concreto, além da sua condutividade térmica. Quando adicionado 2% de nanotubos de carbono em relação a massa de cimento, os ensaios de propriedades elétricas demonstraram um aumento significativo da condutividade elétrica da amostra. A variação da resistividade elétrica de acordo com a carga mecânica aplicada nos corpos de prova evidencia o comportamento piezoresistivo esperado do material. Seus resultados nos ensaios de condutividade térmica não apresentaram variação significativa em relação a amostra de referência, o autor atribui a baixa precisão dos equipamentos utilizados e não foi possível obter conclusões sobre essa propriedade nas amostras analisadas.

Chen et al, 1998, observou a piezoresistividade em compósitos cimentícios com fibra de carbono continuas unidirecionais de 2,6 a 7,4% de volume. Os autores avaliaram a resistência elétrica de suas amostras medindo na direção da fibra e notaram um aumento dessa resistência elétrica aliado aplicação de carga de tração nas amostras.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia usada neste trabalho envolveu a seleção do resíduo a ser incorporado no compósito cimentício, seguido da conformação dos corpos de provas de concreto e caracterização elétrica, física e microestrutural.

O Fluxograma apresentado na Figura 3.1 resume o procedimento estabelecido para o desenvolvimento deste trabalho cujas etapas serão descritas a seguir.

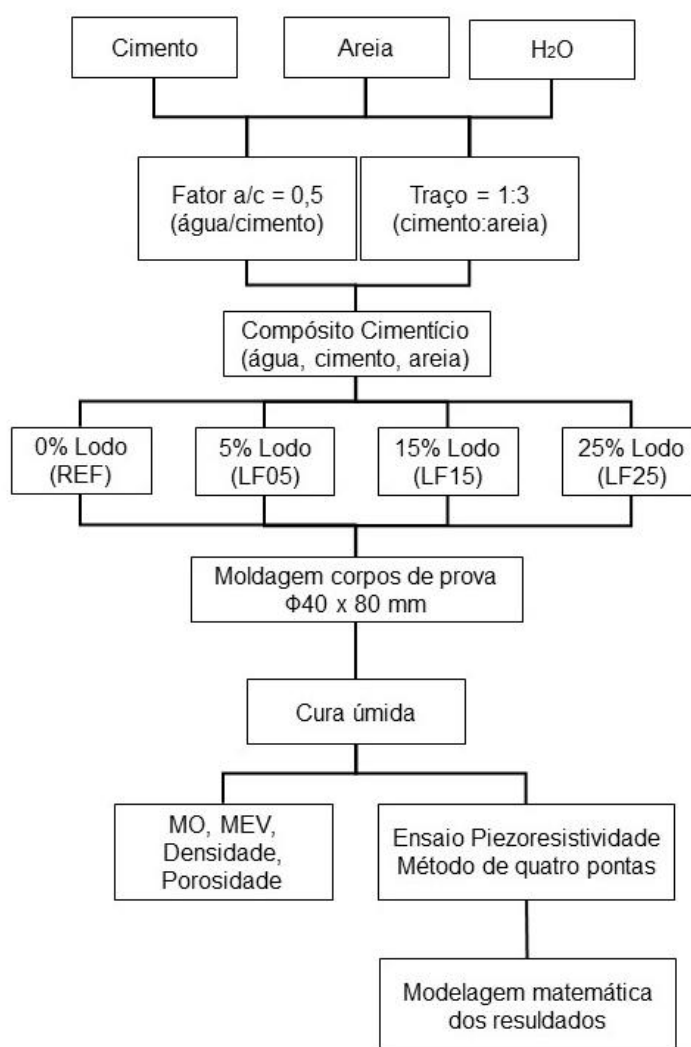


Figura 3.1: Fluxograma de delineamento da pesquisa. Fonte: Autor, 2018.

3.1. MATERIAIS

Para obtenção do composto foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland (CP IV)
- Areia fina, de faixa granulométrica entre de 0,06 mm a 0,2 mm
- Água destilada
- Lodo proveniente do tratamento de efluentes da indústria metal mecânica.

3.1.1. Cimento Portland

Normalizado pela norma NBR 5736, o cimento CP IV-32 recebe adição de cinzas volante em sua fabricação, teores que podem variar entre 15 e 50%. Esse cimento foi selecionado devido a sua disponibilidade e por corresponder a quase a totalidade do cimento consumido na região.

3.1.2. Agregados

O agregado miúdo utilizado nessa pesquisa foi de areia fina de faixa granulométrica entre de 0,06 mm a 0,2 mm, conforme a norma ABNT NBR 6502/95, proveniente do município de Porto Alegre. A areia foi lavada para retirar impurezas orgânicas, seca em estufa, peneirada e armazenada em local livre de umidade.

Não foi empregado agregado graúdo na produção dos corpos de prova devido as dimensões reduzidas dos corpos de prova além de ter como objetivo avaliar principalmente as propriedades elétricas dos compósitos cimentícios. Pela ABNT- NBR 7211/05, agregados graúdos apresentam grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

3.1.3. Água

A água empregada para produção dos concretos é proveniente do reservatório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, alimentado pelo DMAE, após ser submetida ao processo de destilação.

3.1.4. Resíduo incorporado

Lodo proveniente do tratamento de efluentes da indústria metal mecânica: resíduo do tratamento de efluentes do processo de revestimento do aço, processo que tem como finalidade preparar a superfície metálica para o uso e prolongar a sua vida útil. A Figura 3.2 ilustra o lodo já preparado previamente para incorporação na matriz de concreto (MANTOVANI, 2014).



Figura 3.2: Lodo proveniente do tratamento de efluentes da indústria metal mecânica. Fonte: Autor, 2018.

De acordo com o estudo de Brehm, 2013, como pode ser observado na Tabela 3.1, em sua caracterização química os elementos que se apresentaram em maior quantidade no lodo foram Ferro e Enxofre.

Parâmetro	Lodo (mg/g)
Alumínio	4,890
Cromo	0,526
Manganês	1,351
Níquel	0,659
Cobre	0,123
Estrôncio	0,116
Molibdênio	<0,012
Sódio	0,518
Enxofre	22,575
Potássio	0,163
Zinco	6,235
Fósforo	4,861
Ferro	245,3

Tabela 3.1: Caracterização química do lodo. Fonte: Brehm, 2013.

A Figura 3.3 apresenta as principais fases cristalinas identificadas no difratograma de raio x que foram: calcita (CaCO_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de fósforo (P_2O_5), fosfato de cobre ($\text{CuP}_2\text{O}_{10}$) e quartzo (SiO_2) (Mantovani, 2014).

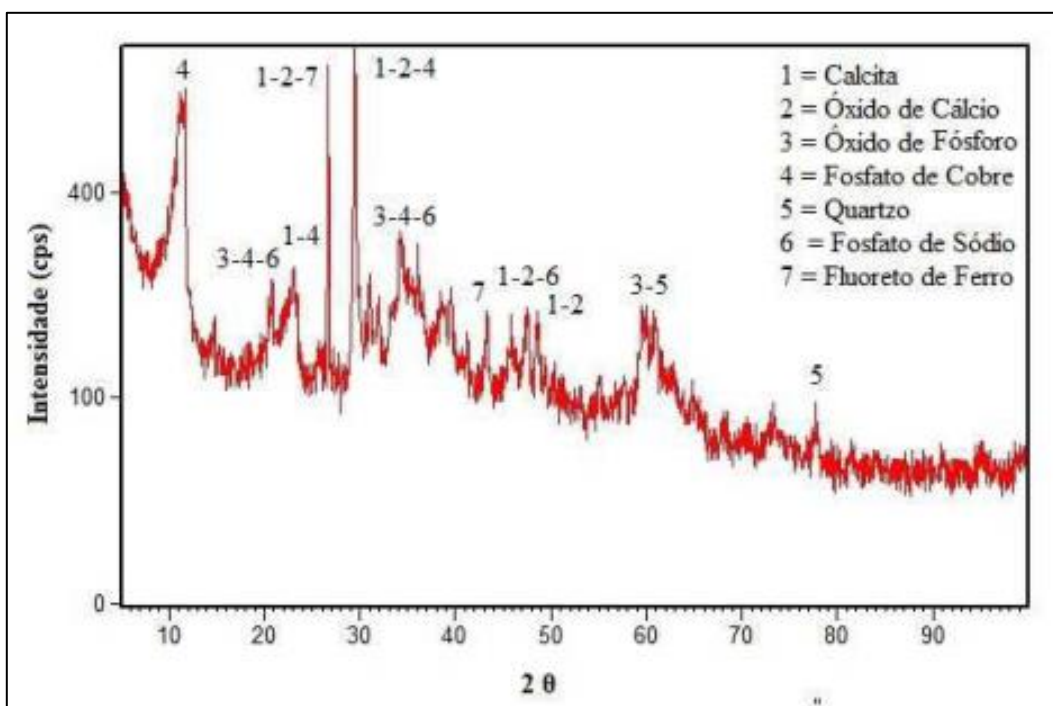


Figura 3.3: Difratoograma de Raio X do lodo. Fonte: Mantovani, 2014.

A análise granulométrica por difração a laser apresentada por Mantovani, 2014, indica como dimensão média de partícula de 44,25 μm , a distribuição granulométrica do lodo é ilustrada na Figura 3.4.

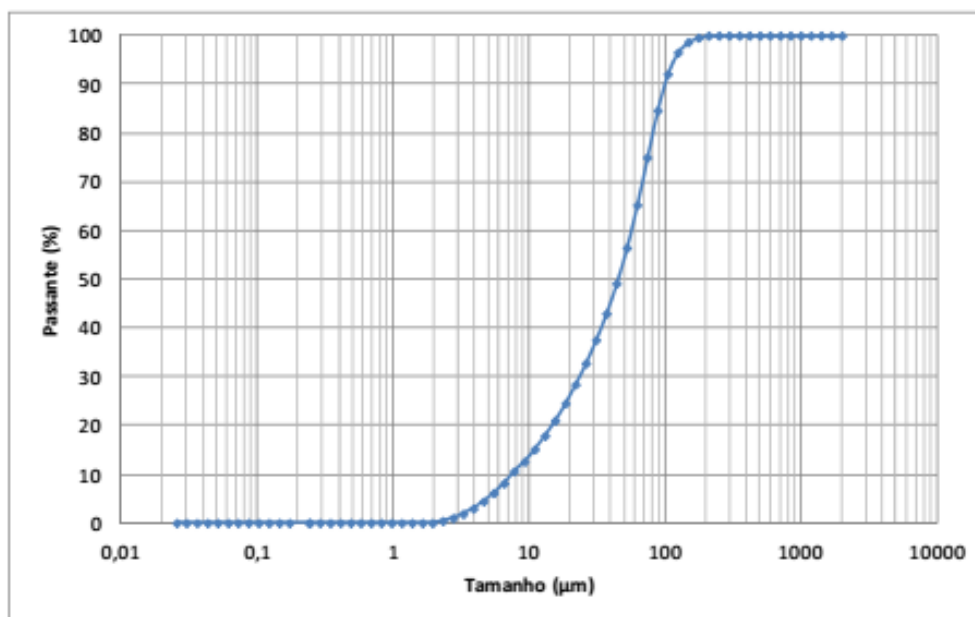


Figura 3.4: Distribuição granulométrica do lodo. Fonte: Mantovani, 2014.

3.2. MÉTODO DE PREPARAÇÃO E CONFORMAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

O processo de preparação das amostras foi manual, com auxílio de uma espátula, até a homogeneização do composto. Inicialmente foi realizada a mistura manual do cimento e da areia, seguido da adição de água, a Figura 3.5 ilustra as etapas de preparação. Afim de estabelecer um padrão nas amostras utilizou-se as relações de água/cimento em 0,5 e o traço de aglomerante/agregado em 1:3, aglomerado se refere a proporção de cimento e agregado a areia fina. Os materiais foram misturados obtendo um compósito cimentício de referência. Posteriormente, esse material foi separado em quatro partes as quais receberam diferentes percentuais de resíduo de acordo com a sua massa. A primeira porção não recebeu resíduo algum, as outras partes receberam respectivamente 5, 15 e 25% de lodo em sua mistura. Conforme Tabela 3.2.



Figura 3.5: Etapas preparação do compósito cimentício de referência. 3.5a) Cimento CP IV + areia fina seca e peneirada. 3.5b) Mistura manual dos componentes secos: cimento e areia. 3.5c) Adição de água de acordo com o teor pré-estabelecido, mistura manual. Fonte: Autor, 2016.

Amostra	% Lodo
Referência(REF)	0
LF05	5
LF15	15
LF25	25

Tabela 3.2: Composições obtidas. Fonte: Autor, 2018.

Após o processo manual de mistura do resíduo, foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões aproximadas de 40 mm de diâmetro e 80 mm de altura, conforme pode ser observado na Figura 3.6. Durante a moldagem dos corpos de prova foi estabelecido um padrão para promover o adensamento, evitando a formação de bolhas e vazios nas amostras. Para este fim, os moldes foram preenchidos com o compósito cimentício até a metade e, com um bastão de vidro foram proferidos 20 golpes na mistura, posteriormente foi adicionado o restante da mistura e novamente adensado. É importante ressaltar que os corpos de provas não foram conformados nas dimensões padrões para ensaios de compressão tendo em vista adequar os corpos de provas para os ensaios elétricos.



Figura 3.6: Corpos de prova. 3.6a) Algumas amostras recém moldadas e identificadas. 3.6b) Corpo de prova desmoldado com dimensão aproximada de 8 cm. Fonte: Autor, 2016.

Após conformação as amostras foram submetidas ao processo de cura úmida, controlada principalmente nas suas primeiras 48 horas, onde os corpos de prova foram mantidos úmidos através de uma manta de cobertura. Passados 28 dias de cura foram iniciados os ensaios, os quais foram analisados a mistura do resíduo, sua microestrutura, densidade e porosidade.

3.3. CARACTERIZAÇÃO

3.3.1. Densidade aparente, porosidade e absorção de água

O princípio utilizado para determinar a densidade e porosidade aparente e absorção de água foi o de Arquimedes que pode ser enunciado como:

“Um fluido em equilíbrio age sobre um monólito nele imerso com uma força vertical orientada de baixo para cima, denominada empuxo, aplicada no centro

de gravidade do volume de fluído deslocado, cuja intensidade é igual a do peso do volume de fluído deslocado”.

A densidade aparente para os corpos de prova, após o processo de cura, foi analisada utilizando-se o método de absorção de Arquimedes, norma internacional ISO 18754:2013, medindo-se o peso seco, peso úmido da amostra e o peso imerso em água, obtendo-se, assim, a densidade aparente a partir da razão entre a porosidade aparente e absorção d'água, calculadas pelas seguintes equações:

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (3.2)$$

$$DA = \frac{M_s}{M_u - M_i} \cdot \rho_L \quad (3.3)$$

onde:

AA = água absorvida

PA = porosidade aparente

DA = densidade aparente

Mu = massa (g) do corpo de prova úmido;

Mi = massa (g) do corpo de prova imerso em água;

Ms = massa do corpo de prova seco 110°C.

ρ_L = densidade do meio líquido

A balança da Marca BEL utilizada em todo o processo para pesagem dos materiais, determinação de suas quantidades e do ensaio de densidade e porosidade através do método de Arquimedes.

3.3.2. Microscopia ótica

As amostras foram lixadas e polidas com alumina 1 μm para serem analisadas em um microscópio ótico de Marca LEICA Modelo DM750M ligado ao computador através do software LAS EZ, Figura 3.7.

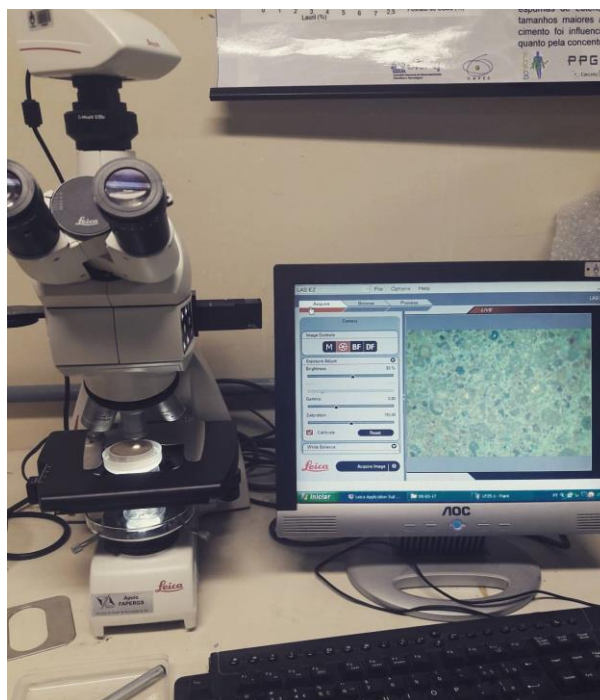


Figura 3.7: Microscópio Ótico Leica, software LAS EZ. Fonte: Autor, 2018.

3.3.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS)

As amostras foram cortadas, embutidas em resina, lixadas e polidas com alumina 1 μm para serem analisadas em um microscópio eletrônico de varredura de marca JEOL e modelo JSM6060. No microscópio da marca Hitachi e modelo TM3000 foi feita a análise dos elementos químicos da superfície da amostra por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Na Figura 3.8 as amostras preparadas e metalizadas para o ensaio de MEV.

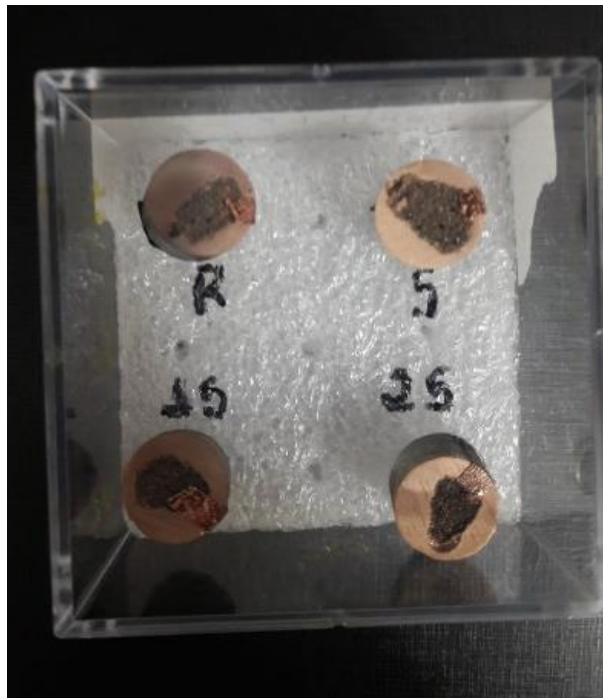


Figura 3.8: Amostras preparadas e metalizadas para o MEV. Fonte: Autor, 2018.

3.2.4 Caracterização Piezoelétrica dos Materiais

Para realização do ensaio de piezoresistividade foi utilizado o método de quatro pontas co-linear, conforme o circuito esquematizado na Figura 3.9. A partir desse circuito foram realizadas as medidas elétricas a fim de determinar a resistividade da amostra em diferentes carregamentos de compressão de 0 a 2,1kN.

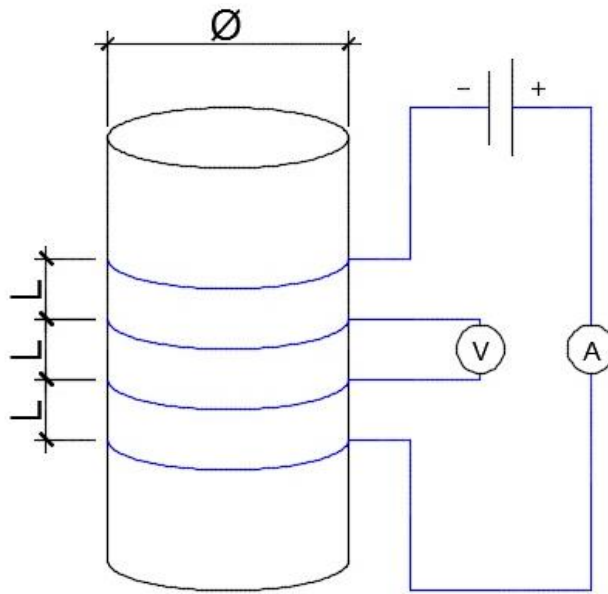


Figura 3.9: Esquema circuito, método de quatro pontas. Fonte: Autor, 2018.

Em cada amostra foram instalados quatro eletrodos, constituídos em fios de prata com 95% de pureza e 0,30 mm de espessura. Na Figura 3.10 pode-se observar os corpos de prova com eletrodos preparados para o ensaio piezoresistivo.

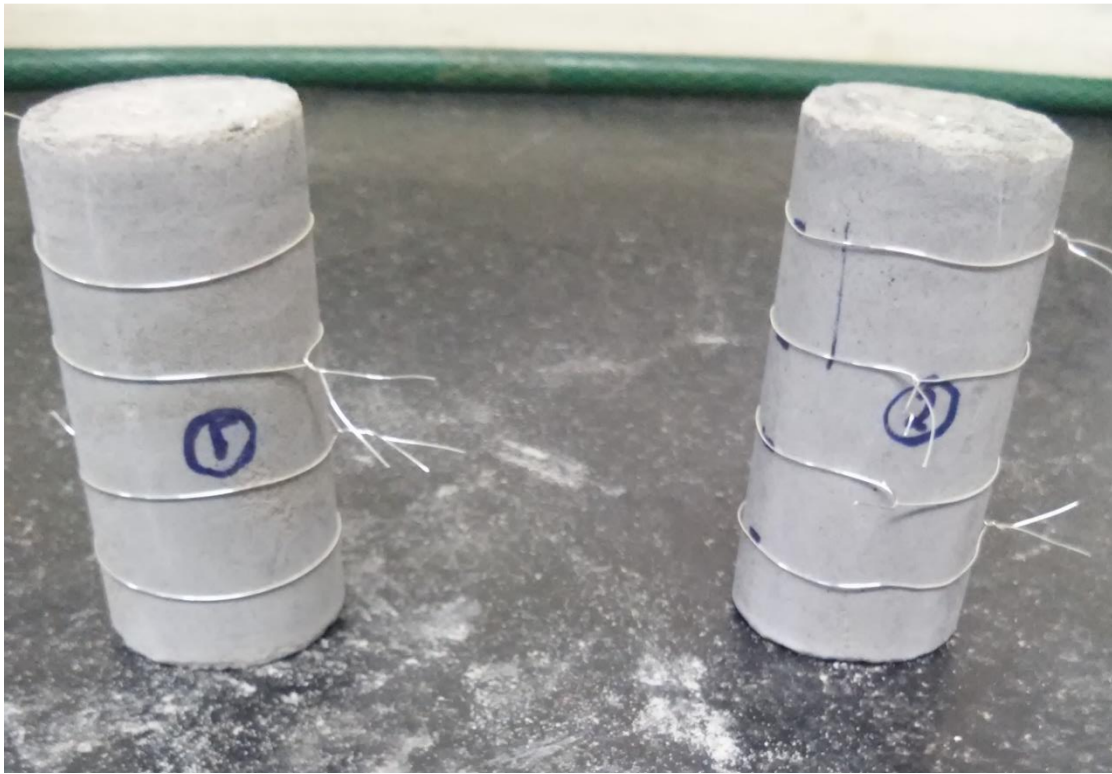


Figura 3.10: Corpos de prova com eletrodos de prata. Fonte: Autor, 2018.

Os valores de resistência elétrica foram obtidos nos ensaios através do equipamento Multímetro Digital da marca e referência TEKTRONIX-DMM4040, mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11: Multímetro Digital Tektronix DMM4040. Fonte: Autor, 2018.

Simultaneamente a realização das medidas de resistência elétrica os corpos de prova foram submetidos a compressão aplicando carga de 0 a 2 kN utilizando a máquina de ensaios universal da marca INSTRON modelo 3369, Figura 3.12. A velocidade de compressão foi fixada em 1 mm/min e simultaneamente com o auxílio de um equipamento de filmagem foram registradas as medidas de resistência elétrica em função da variação de pressão. Após a análise dos dados obtidos foram traçados gráficos relacionando a carga mecânica aplicada com a resistência elétrica medida em cada intervalo de carregamento.

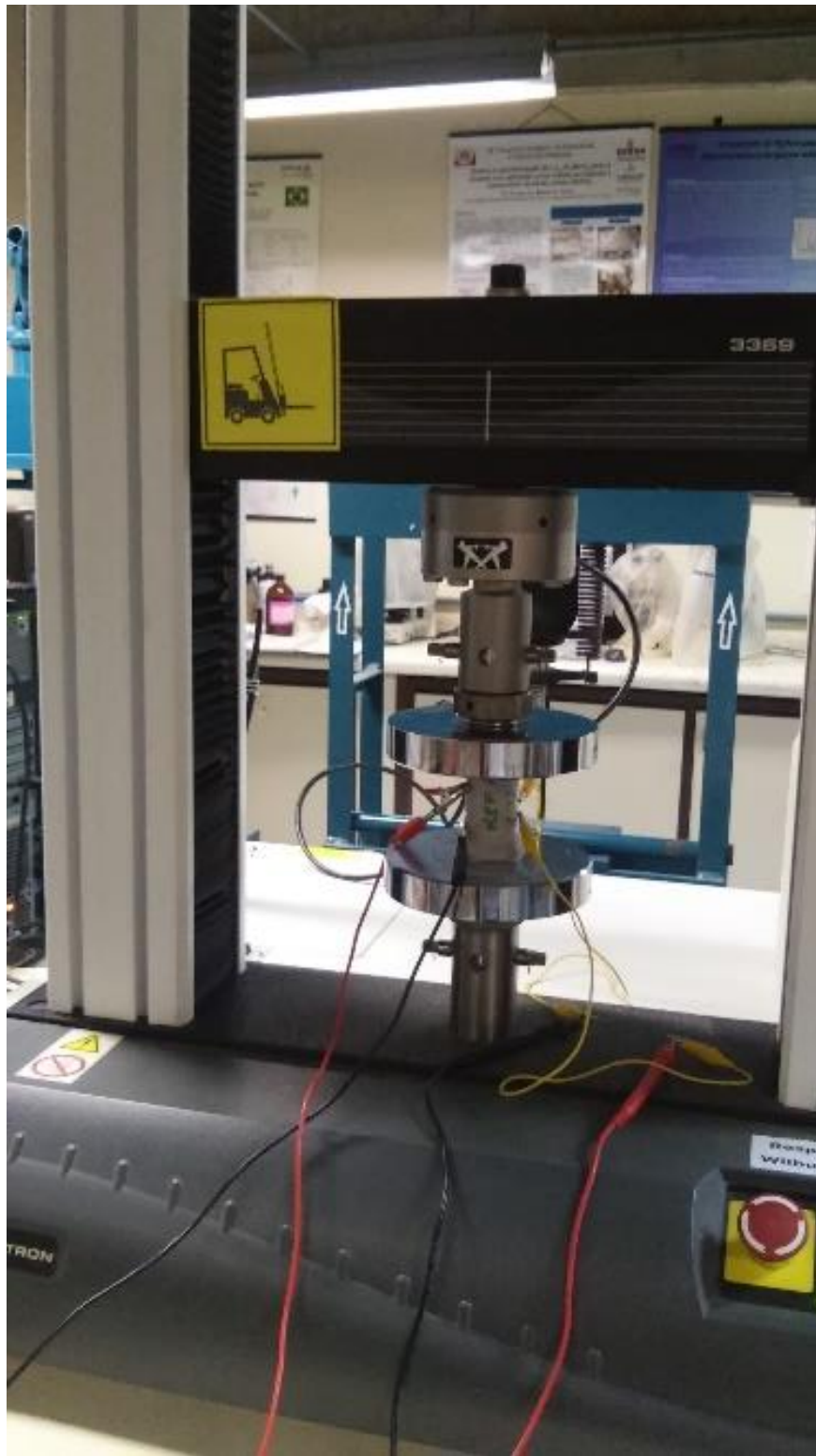


Figura 3.12: Instron 3369. Fonte: Autor, 2018.

A resistividade elétrica (ρ) da amostra foi calculada a partir da resistência elétrica obtida no ensaio. A Equação 3.4 da resistividade da amostra considera a relação entre a tensão elétrica (t) e área da amostra (W) com a corrente elétrica (I) e distância entre os eletrodos (L).

$$R = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W} \quad (3.4)$$

Na Equação 3.5, observa-se que a resistência elétrica é a razão entre a tensão (V) e a corrente (I) elétrica.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.5)$$

Os valores de resistência elétrica são conhecidos a partir do ensaio realizado, bem como a área dos corpos de prova e distância entre os eletrodos. Para determinar a resistividade elétrica da amostra em relação a carga de compressão aplicada, utilizou-se a Equação 3.6, onde aplica-se diretamente a resistência elétrica (R).

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (3.6)$$

A condutividade elétrica é o inverso da resistividade, como é apresentado na Equação 3.7.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.7)$$

Para determinar a potência elétrica das amostras e sua relação com a pressão mecânica ensaiada parte-se da Equação 3.8, que demonstra a função entre essa e as corrente e tensão elétricas. Porém, como o ensaio foi realizado diretamente com a fonte, utilizando o método de medição por quatro pontas e tomando sua resistência elétrica, através do manual de instruções do equipamento foi possível determinar a tensão elétrica aplicada de acordo com a faixa de valores de resistência elétrica medidos.

$$P = VI \quad (3.8)$$

A piezoresistividade é determinada pela variação da resistividade elétrica em relação a resistividade elétrica inicial, como pode ser observado pela Equação 3.9.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (3.9)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS

O ensaio de microscopia óptica, observado na Figura 4.1, demonstra a distribuição da mistura entre os materiais no compósito cimentício e a incorporação dos diferentes percentuais de lodo na amostra. Pode-se observar uma pequena diminuição no tamanho das partículas conforme aumentado o percentual de lodo na amostra, é notável também a diferença de coloração dos corpos de prova devido a composição do resíduo.

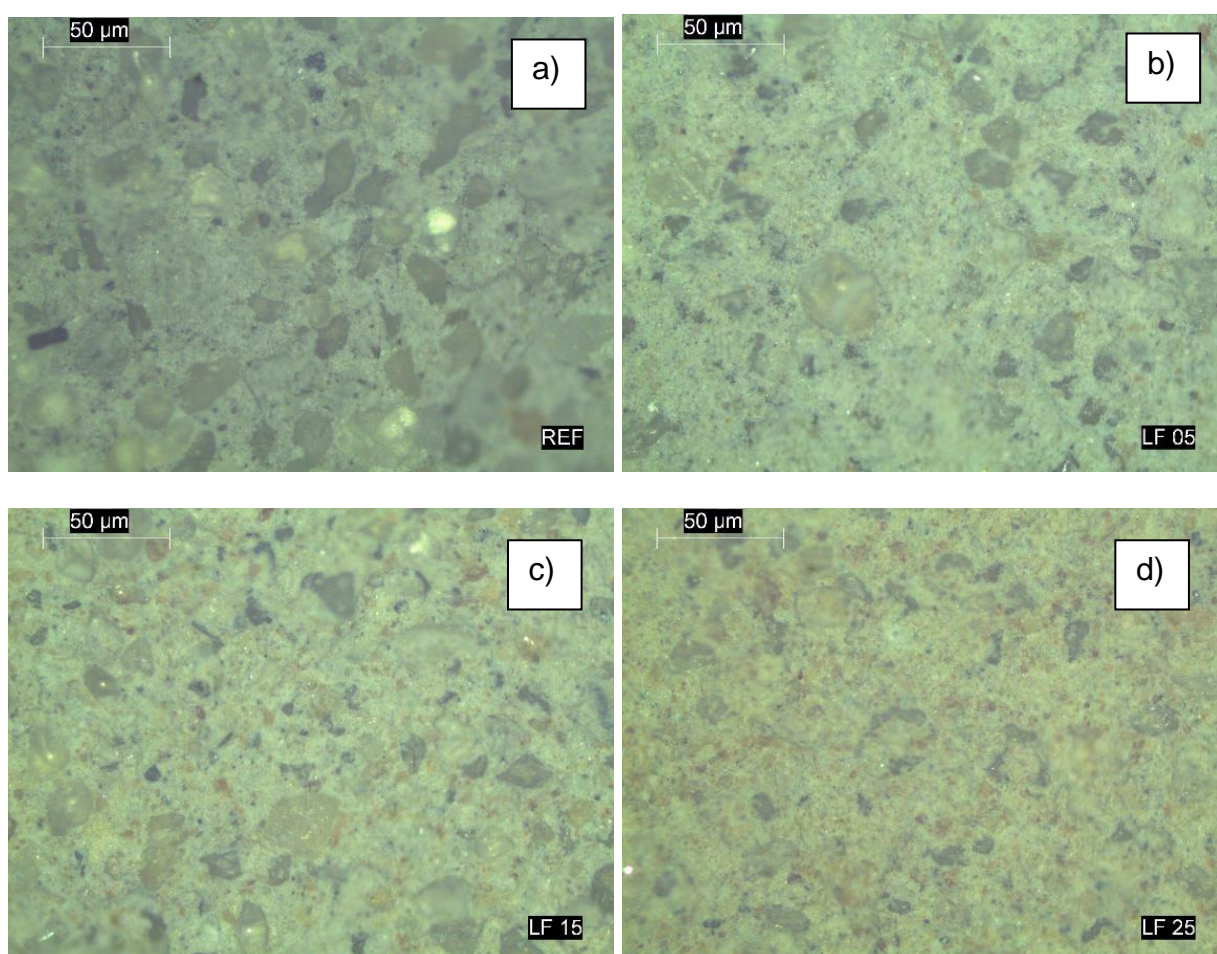


Figura 4.1: Microscopia óptica nas amostras de referência e com lodo incorporado. 4.1a) Amostra referência. 4.1b) Amostra com 5% de lodo. 4.1c) Amostra com 15% de lodo. 4.1d) Amostra com 25% de lodo. Fonte: Autor, 2018.

As Figuras 4.2 a 4.5, apresentam as micrografias obtida por microscopia

eletrônica de varredura (MEV) de todas as amostras. É possível observar que a porosidade das amostras tende a aumentar com a incorporação do lodo, nos compósitos cimentícios onde foram 15 e 25% de resíduo, Figuras 4.3 e 4.4 respectivamente, observa-se a formação de partículas com morfologia diferenciada, partículas em formato de agulhas.

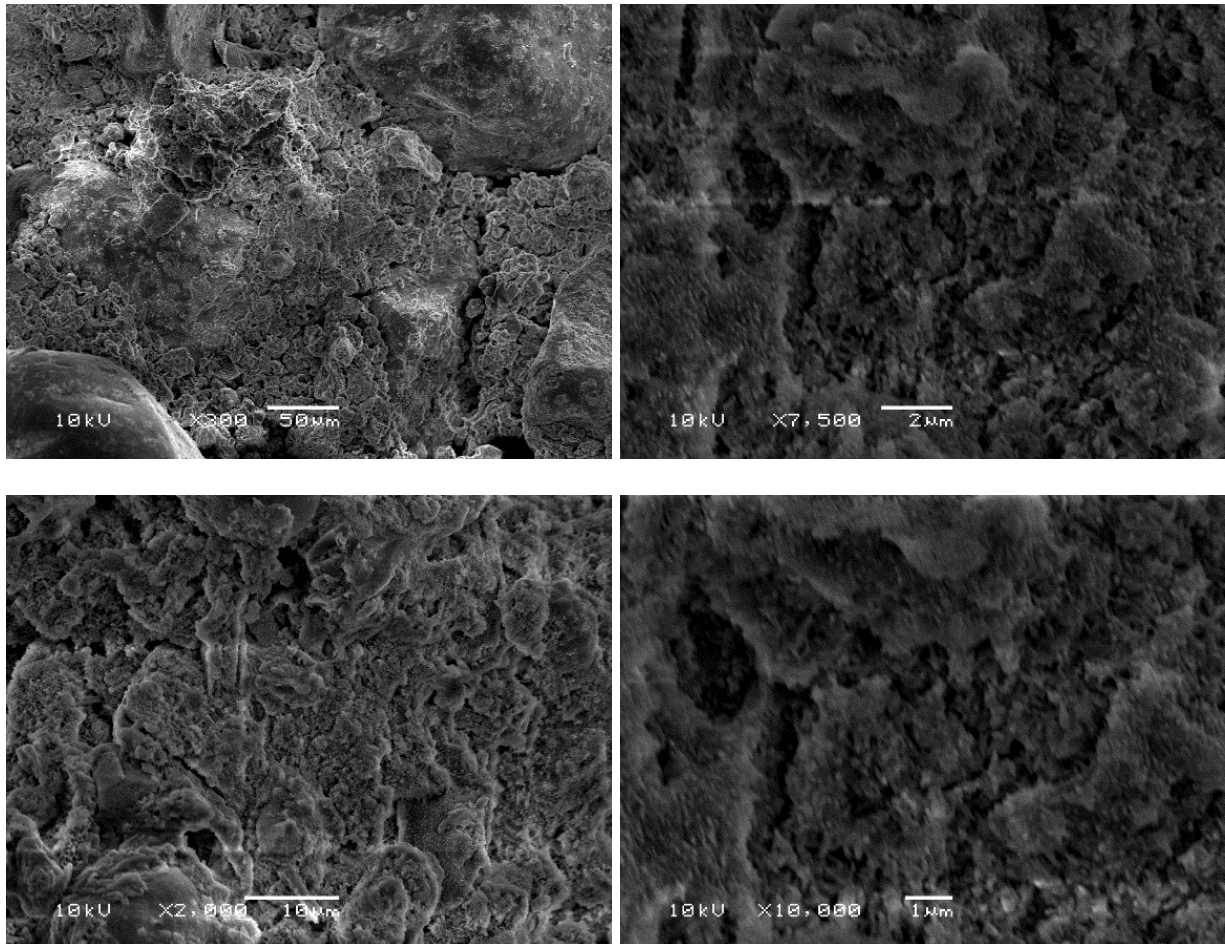


Figura 4.2: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra de referência em diferentes aumentos.
Fonte: Autor, 2018.

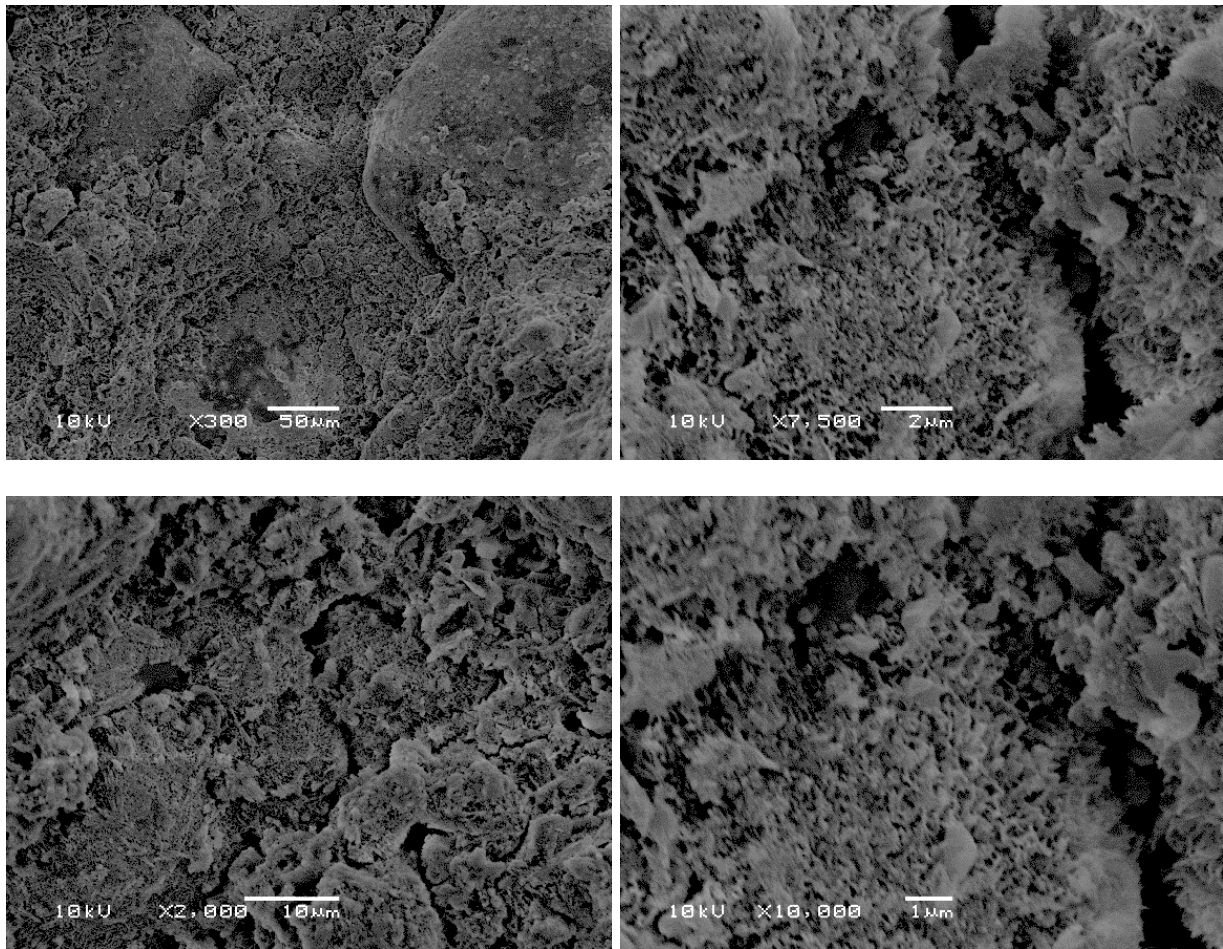


Figura 4.3: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra com 5% lodo incorporado. Fonte: Autor, 2018.

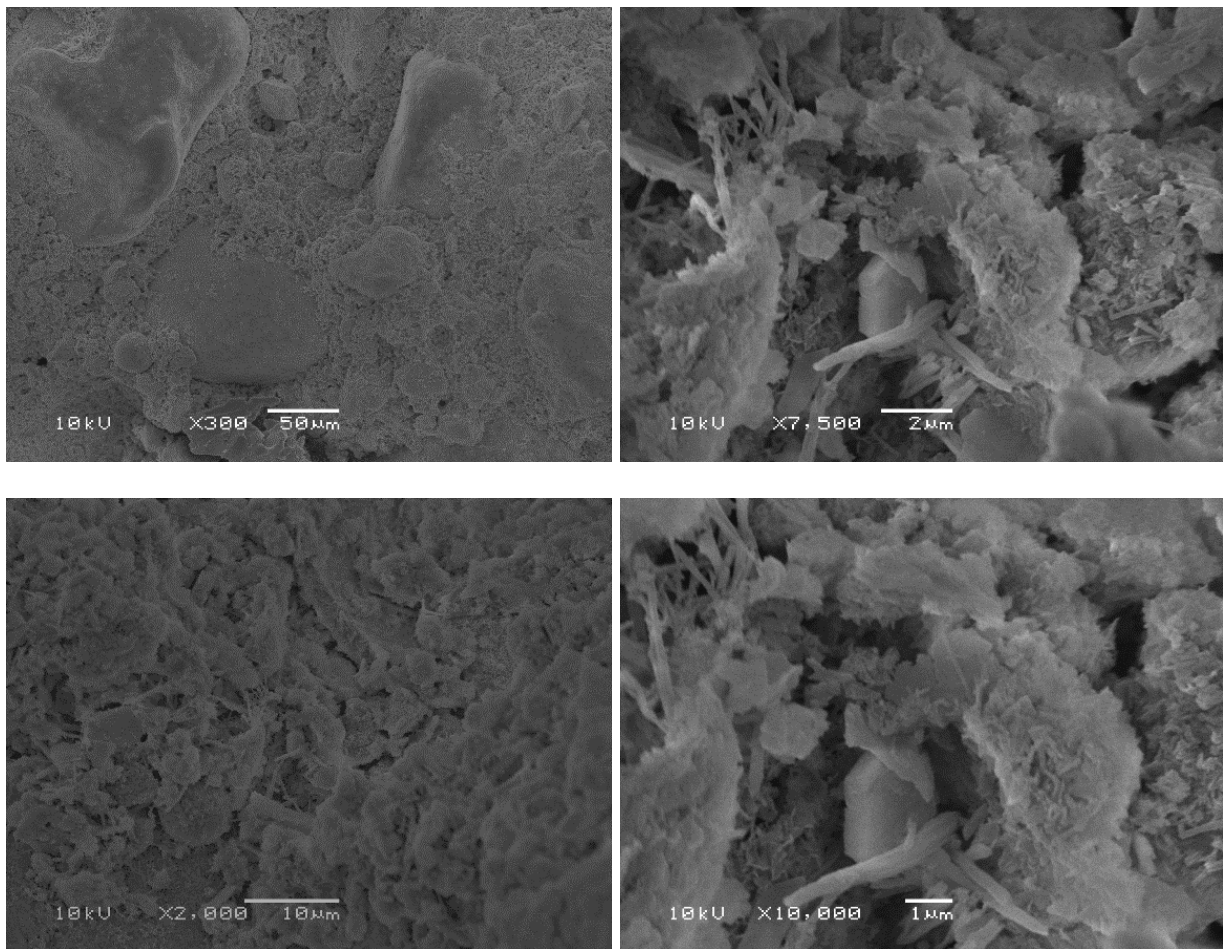


Figura 4.4: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra com 15% lodo incorporado. Fonte: Autor, 2018.

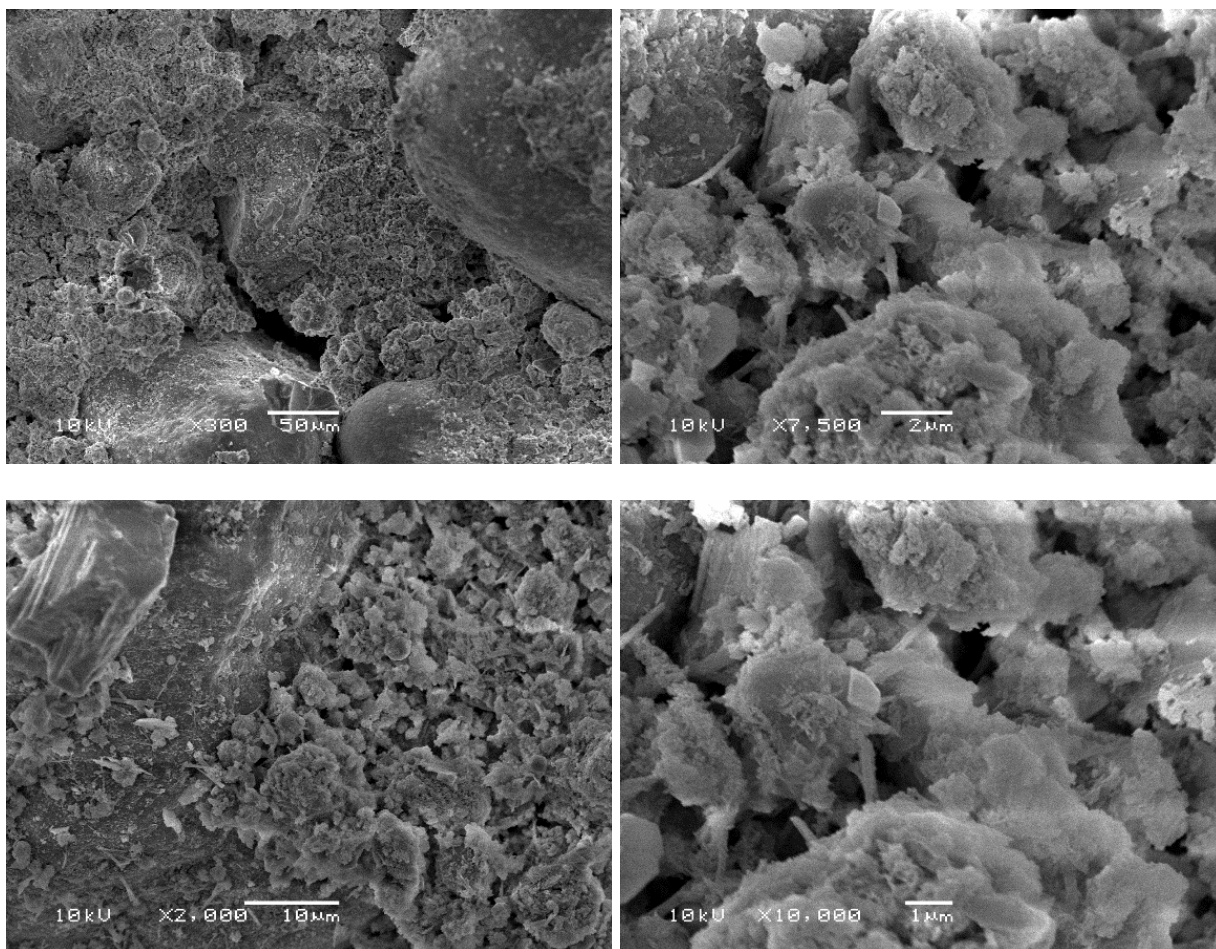


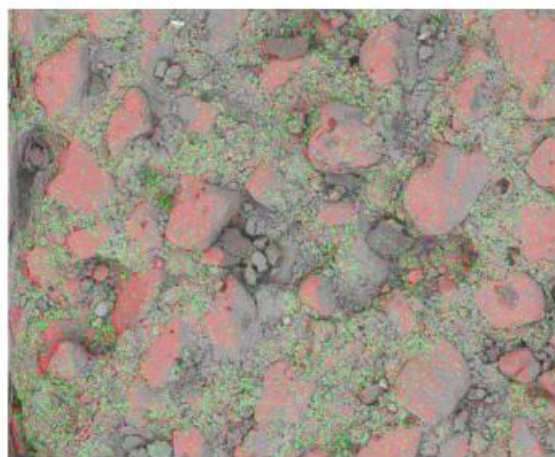
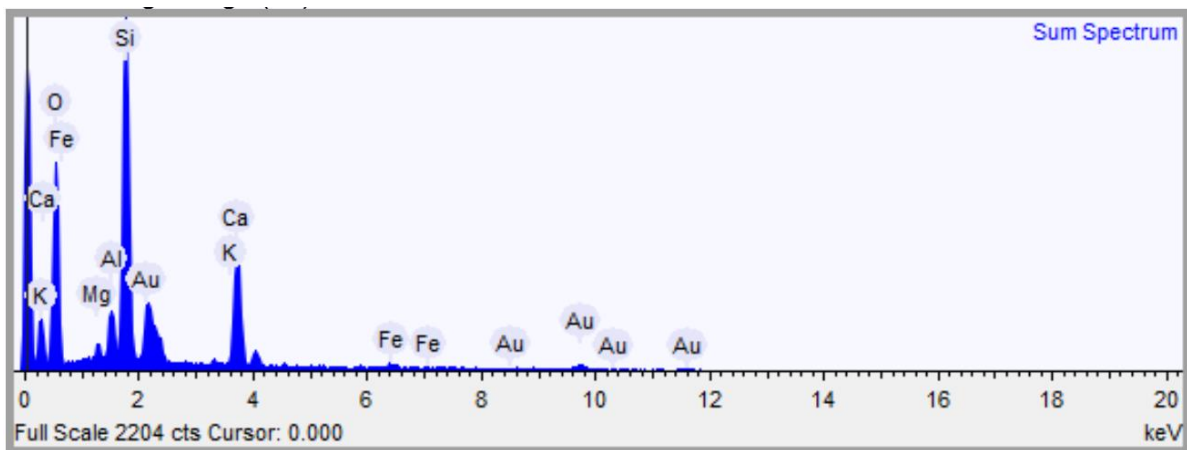
Figura 4.5: Microscopia Eletrônica de Varredura amostra com 25% lodo incorporado. Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos por EDS. De acordo com a Tabela pode se observar o aumento do teor de ferro e magnésio quanto maior a concentração de lodo na superfície das amostras, diminuindo silício e mantendo praticamente constante os outros elementos.

Elemento	Superfície % (REF)	Superfície % (LF05)	Superfície % (LF15)	Superfície % (LF25)
Oxigênio	40.906	49.928	44.879	41.453
Magnésio	0.507	1.666	3.403	6.007
Alumínio	1.463	2.591	2.438	1.277
Silício	13.060	10.777	11.679	4.998
Cálcio	9.942	30.625	14.729	13.670
Ferro	2.442	3.856	8.867	11.406

Tabela 4.1. Elementos químicos observados na superfície das amostras e seus percentuais.
Fonte: Autor, 2018.

Os gráficos referentes aos ensaios realizados, ilustrados nas Figuras 4.6, demonstram os elementos encontrados nas amostras. Alguns casos são exibidos elementos como ouro (Au) e carbono (C), esses elementos se referem ao processo de metalização e preparo das amostras para o ensaio e não fazem parte de sua composição.



700µm

Mixed



700µm

Silicon Ka1



700µm

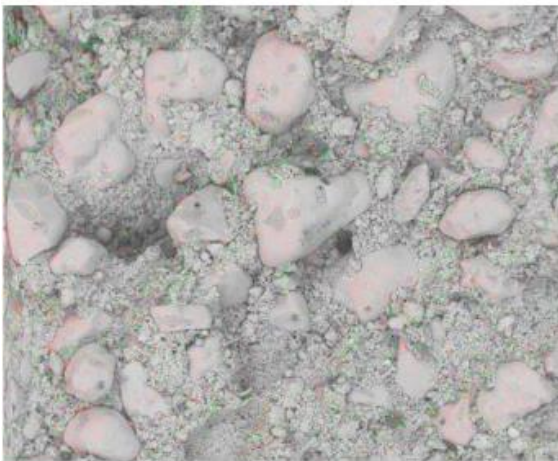
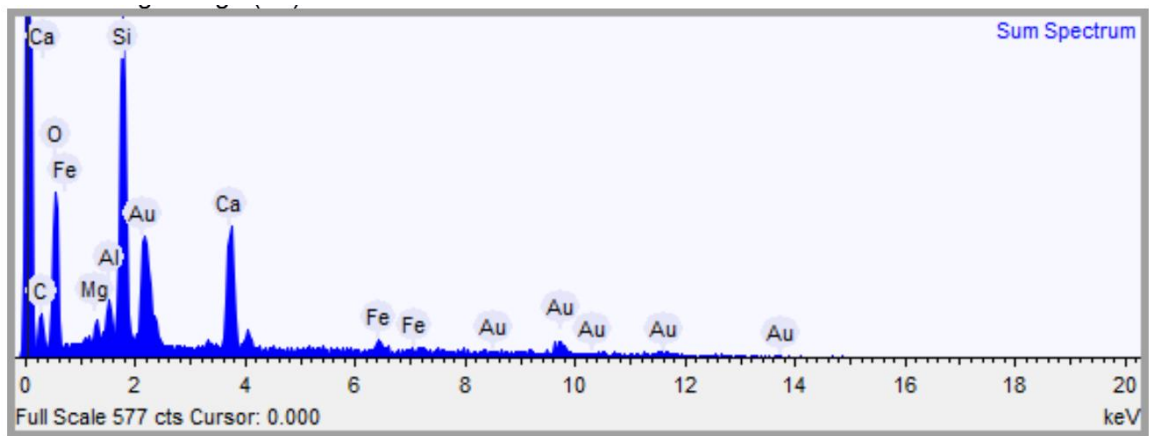
Aluminum Ka1



700µm

Iron Ka1

Figura 4.6: Análise EDS amostra de Referência. Fonte: Autor, 2018



700μm

Mixed



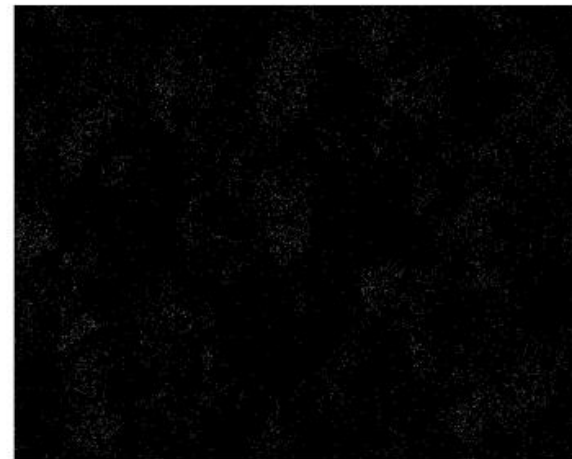
700μm

Iron Ka1



700μm

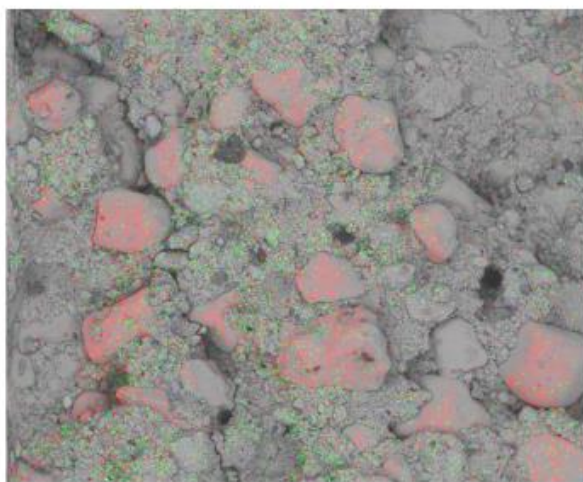
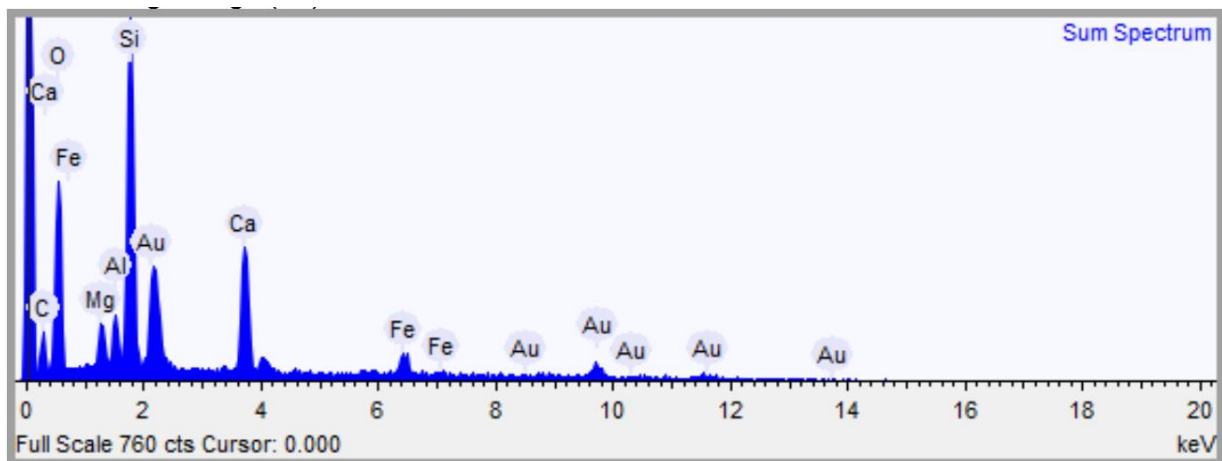
Calcium Ka1



700μm

Silicon Ka1

Figura 4.7: Análise EDS amostra com 5% de resíduo incorporado. Fonte: Autor, 2018.



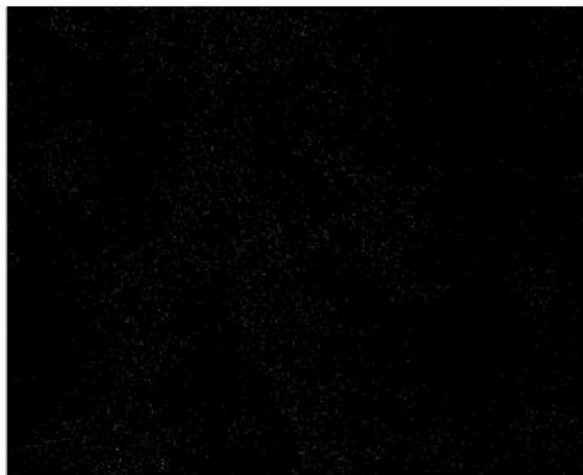
700µm

Mixed



700µm

Iron Ka1



700µm

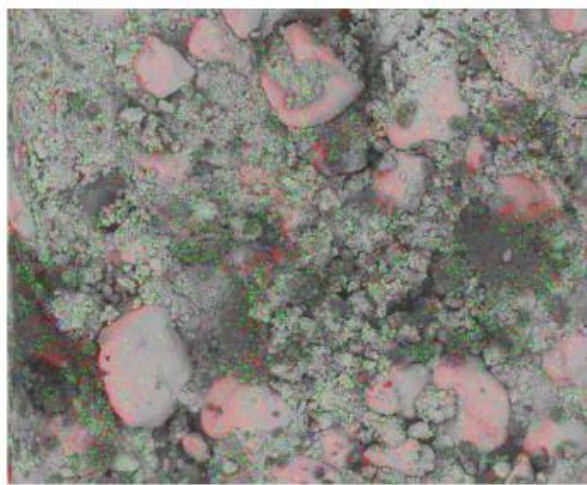
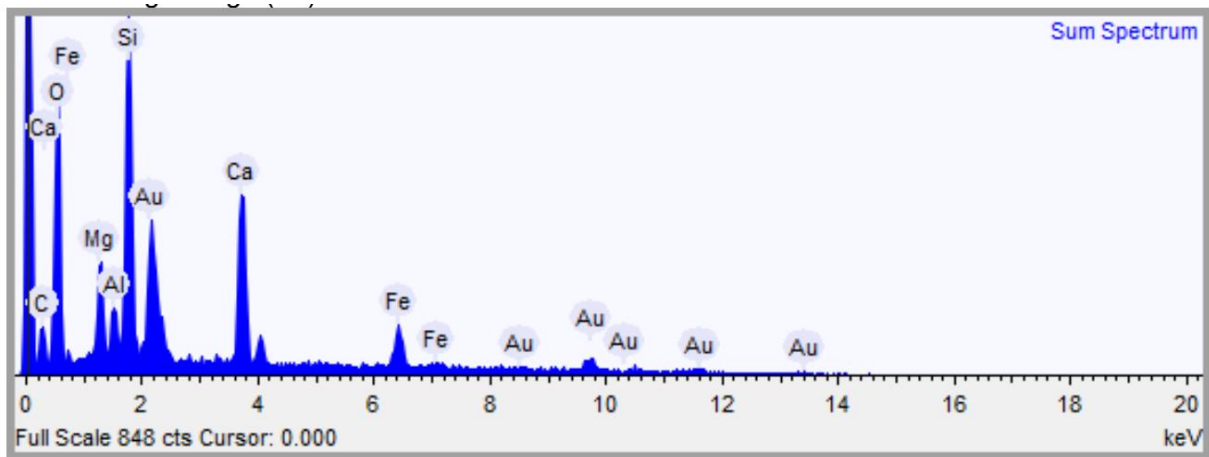
Calcium Ka1



700µm

Silicon Ka1

Figura 4.8: Análise EDS amostra com 15% de resíduo incorporado. Fonte: Autor, 2018.



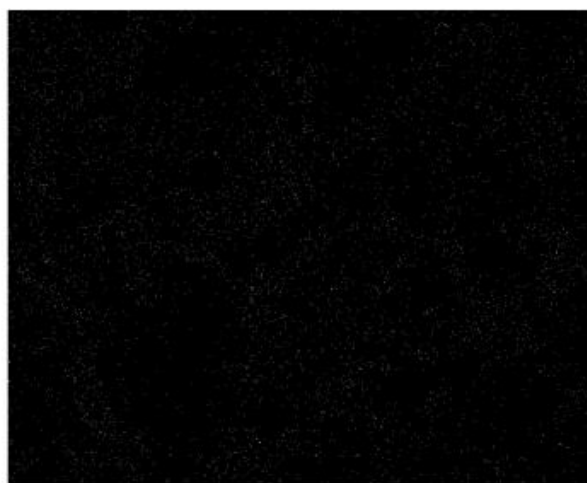
700µm

Mixed



700µm

Iron Ka1



700µm

Calcium Ka1



700µm

Silicon Ka1

Figura 4.9: Análise EDS amostra com 25% de resíduo incorporado. Fonte: Autor, 2018

4.2.CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A Tabela 4.2 apresenta os resultados referentes a densidade e porosidade aparente e absorção de água com e sem incorporação do lodo. Observa-se que a amostra de referência apresentou menores valores de absorção de água e porosidade e maior densidade aparente. As amostras com lodo obtiveram maiores valores de absorção e porosidade e menor valor de densidade em relação aos valores obtidos no compósito cimentício sem resíduo. O aumento na concentração de resíduo tende a aumentar a porosidade aparente e absorção de água e consequentemente reduz a densidade aparente e resistência mecânica.

Os compostos cimentícios tendem a ser porosos uma vez que não é possível preencher todos os vazios com a pasta de cimento. Em relação a resistência mecânica sabe-se que o menor percentual de porosidade indica melhor desempenho estrutural em compósitos cimentícios, a faixa de valores geralmente encontradas são de 10 a 20% de poros como citam Sato, 1998 e Abreu, 1998 em seus trabalhos. Logo, as amostras analisadas apresentaram porosidades na ordem de 16 a 29%.

	REF	LF05	LF15	LF25
Absorção de Água (%)	8,73	11,60	14,52	19,77
Porosidade Aparente (%)	16,89	21,09	23,40	29,17
Densidade Aparente (g/cm ³)	1,93	1,82	1,61	1,48

Tabela 4.2. Absorção de água, densidade e porosidade aparente das amostras com e sem incorporação do lodo. Fonte: Autor, 2018.

4.3. EFEITO DA ADIÇÃO DO RESÍDUO SOBRE A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Na Tabela 4.3 podem ser observadas as tensões de compressão mecânica que as amostras sofreram ruptura, não foram avaliadas as propriedades mecânicas e os corpos de prova não obedecem ao padrão de ensaios de compressão. As amostras de referência e com 5% de resíduo possuem valores de resistência mecânica próximos ao encontrado por Fernandes, 2016, em seu trabalho. As baixas resistências mecânicas das amostras com maior concentração de lodo são efeitos da alta porosidade desses corpos de prova, que fica evidenciada pelos ensaios de microscopia eletrônica de varredura e de características físicas; isso impossibilitou a avaliação elétrica em maiores cargas de compressão.

	Tensão de Ruptura (Mpa)
REF	8,89
LF05	7,92
LF15	0,98
LF25	0,81

Tabela 4.3: Tensão de ruptura por compressão. Fonte: Autor, 2018.

4.4. COMPORTAMENTO ELÉTRICO

Através do método de quatro pontas foram determinadas as medidas de resistência elétrica da amostra, variando-se a carga mecânica aplicada. A Figura 4.10 demonstra a variação da resistência elétrica em função da pressão aplicada. Pode-se observar que para todas amostras contendo lodo, ocorre um decréscimo da resistência à medida que a compressão aumenta. O corpo de prova de referência, apenas com o compósito cimentício, apresentou valores menores de resistência elétrica e a diminuição na resistência com o aumento da compressão não foi tão significativa. As amostras com 15 e 25% de lodo obtiveram um comportamento mecânico não elástico em relação a pressão mecânica, compressão, em valores acima de 900 kPa, por esse motivo, pressões acima desta não foram avaliadas nestas amostras.

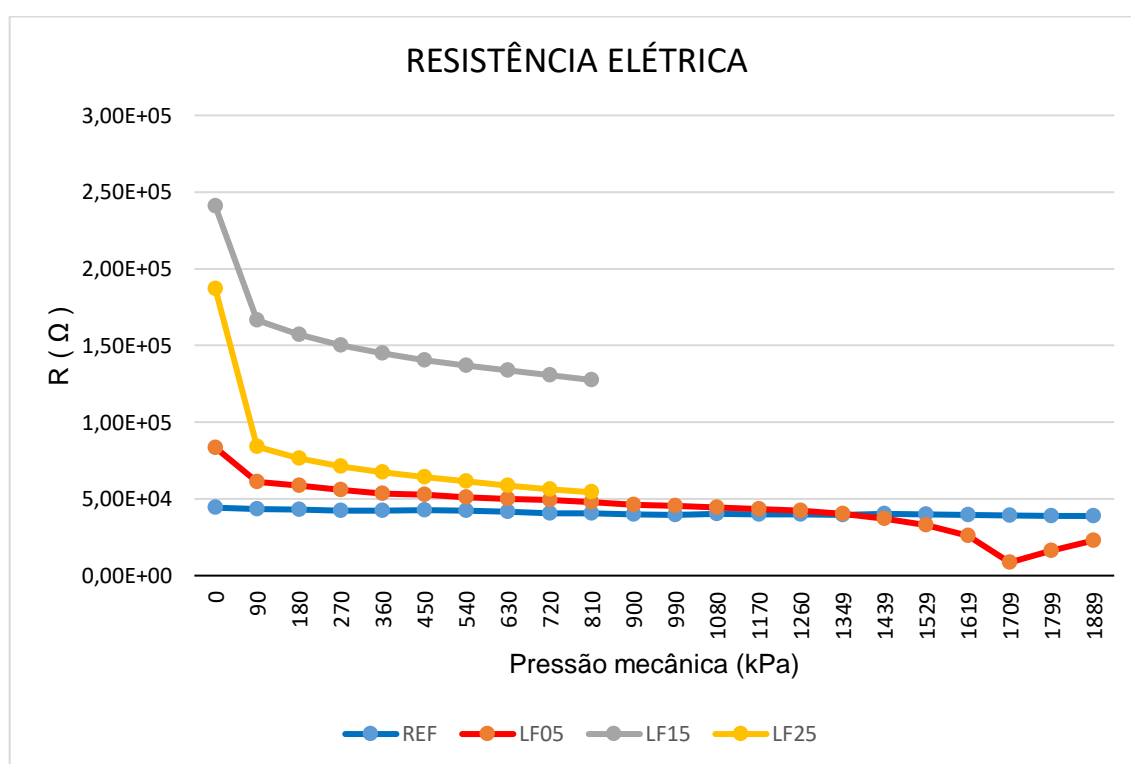


Figura 4.10: Resistência elétrica em relação a pressão mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.

A resistência elétrica da amostra do compósito cimentício de referência foi de $4,4 \times 10^4 \, \Omega$, em seu trabalho Loamrat et al., 2014, apresenta valores de resistência entre 1×10^3 e $2 \times 10^3 \, \Omega$ para pasta de cimento e água. Dentre as diversas variáveis que influenciam as medidas elétricas de compósitos cimentícios, pode-se atribuir a diferença de resistência elétrica a presença de areia nos compósitos deste estudo, sendo basicamente sílica, um material cerâmico, é esperado que apresente uma resistência elétrica mais elevada e também a porosidade presente nestes corpos de provas.

Na Figura 4.11, observa-se a relação da resistividade elétrica em função da pressão mecânica aplicada nas amostras analisadas. Observa-se que a amostra de referência apresentou valores de resistividade menor do que as amostras contendo lodo, na ordem de $5 \times 10^6 \, \Omega \cdot \text{cm}$ e permanece praticamente constante quanto maior a pressão aplicada, ocorreu uma redução de 1,73% na resistividade elétrica. Por outro lado, as amostras contendo lodo apresentam inicialmente resistividade entre $0,9 \times 10^7$ a $2,7 \times 10^7 \, \Omega \cdot \text{cm}$ tendendo a diminuir drasticamente, 27 a 55% com a pressão aplicada, principalmente nas amostras contendo acima de 15 % de lodo. A variação da resistividade elétrica se deve a carga de compressão aplicada na amostra.

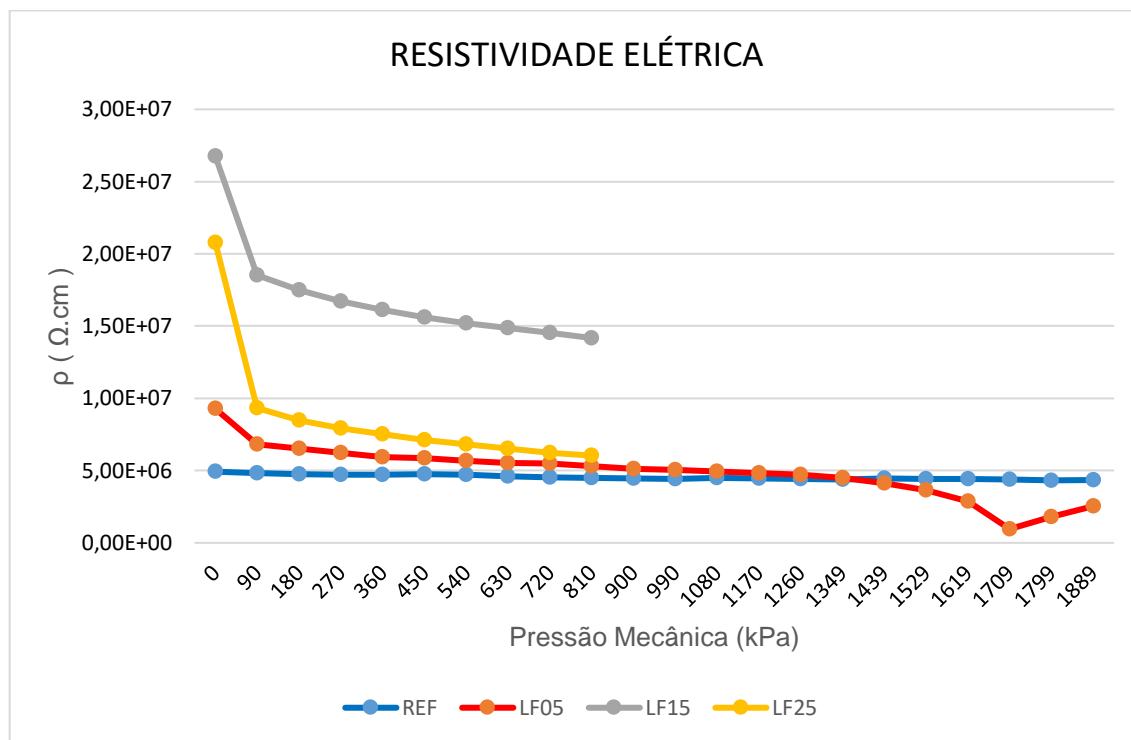


Figura 4.11: Resistividade elétrica em relação a pressão mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.

Em relação à resposta piezoresistiva, pôde-se verificar que as amostras contendo resíduo mostraram uma variação mais acentuada deste comportamento em função da pressão aplicada. Na Figura 4.12 observa-se a piezoresistividade teve comportamento linear durante a compressão, conforme esperado, houve uma mudança nesse comportamento na amostra com 5% de lodo em pressões acima 12,6 MPa. Han e Ou, 2007, demonstram em seu trabalho curvas de piezoresistividade em função da compressão mecânica em corpos de prova de pasta de cimento reforçados com fibra de carbono e nanotubos de carbono, os autores apresentam piezoresistividade expressa em percentual. Como citado anteriormente a diferença entre os materiais estudados sugere uma magnitude diferente de valores, porém o comportamento piezoresistivo é semelhante.

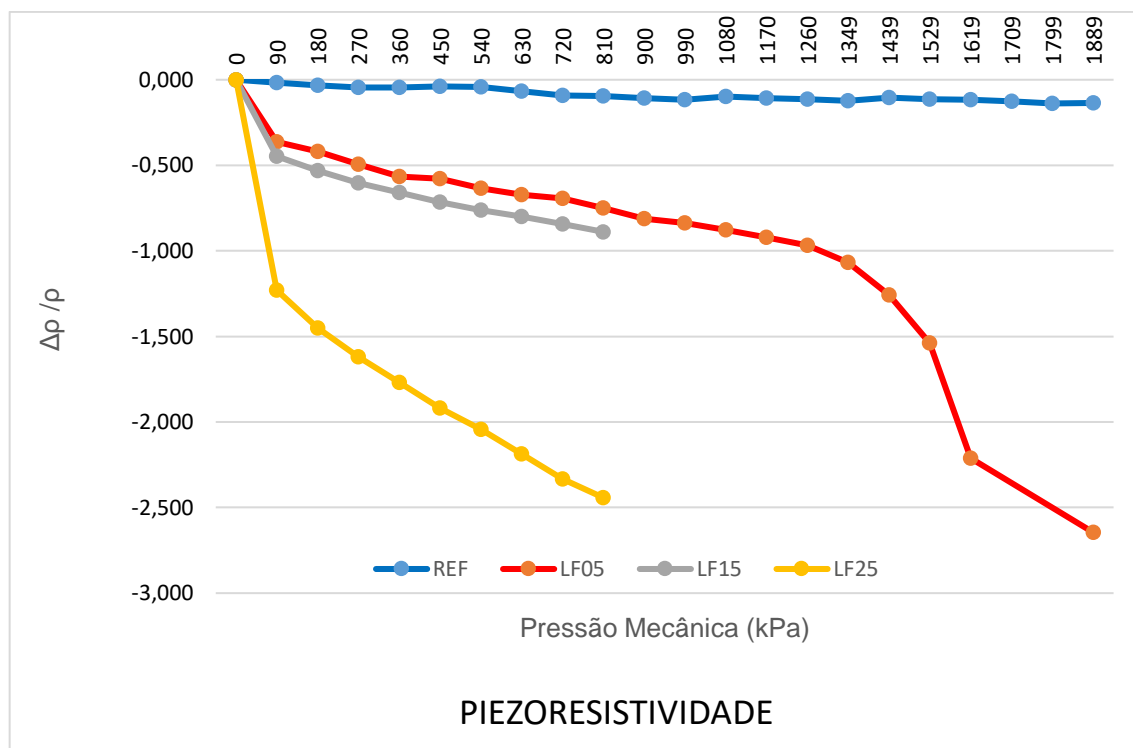


Figura 4.12: Piezoresistividade elétrica em relação a pressão mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.

Na Tabela 4.4 foram apresentados os valores de resistência, resistividade e condutividade elétricas, sendo as duas últimas dimensionadas a partir do ensaio elétricos.

kPa	REFERÊNCIA			LF 05			LF 15			LF 25		
	RESISTÊNCIA (Ω)	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot \text{cm}$)	CONDUTIVIDADE (S/cm)	RESISTÊNCIA (Ω)	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot \text{cm}$)	CONDUTIVIDADE (S/cm)	RESISTÊNCIA (Ω)	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot \text{cm}$)	CONDUTIVIDADE (S/cm)	RESISTÊNCIA (Ω)	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot \text{cm}$)	CONDUTIVIDADE (S/cm)
0	4,43E+04	4,92E+06	2,03E-07	8,35E+04	9,28E+06	1,08E-07	2,41E+05	2,68E+07	3,74E-08	1,87E+05	2,08E+07	4,81E-08
90	4,35E+04	4,84E+06	2,07E-07	6,12E+04	6,80E+06	1,47E-07	1,67E+05	1,85E+07	5,40E-08	8,39E+04	9,33E+06	1,07E-07
180	4,29E+04	4,77E+06	2,10E-07	5,88E+04	6,54E+06	1,53E-07	1,57E+05	1,75E+07	5,72E-08	7,63E+04	8,48E+06	1,18E-07
270	4,24E+04	4,71E+06	2,12E-07	5,59E+04	6,22E+06	1,61E-07	1,50E+05	1,67E+07	5,99E-08	7,14E+04	7,93E+06	1,26E-07
360	4,24E+04	4,71E+06	2,12E-07	5,33E+04	5,93E+06	1,69E-07	1,45E+05	1,61E+07	6,20E-08	6,75E+04	7,51E+06	1,33E-07
450	4,27E+04	4,74E+06	2,11E-07	5,29E+04	5,87E+06	1,70E-07	1,40E+05	1,56E+07	6,40E-08	6,41E+04	7,13E+06	1,40E-07
540	4,25E+04	4,72E+06	2,12E-07	5,10E+04	5,67E+06	1,76E-07	1,37E+05	1,52E+07	6,58E-08	6,15E+04	6,83E+06	1,46E-07
630	4,15E+04	4,61E+06	2,17E-07	4,99E+04	5,55E+06	1,80E-07	1,34E+05	1,49E+07	6,73E-08	5,87E+04	6,52E+06	1,53E-07
720	4,06E+04	4,51E+06	2,22E-07	4,93E+04	5,48E+06	1,83E-07	1,31E+05	1,45E+07	6,89E-08	5,61E+04	6,24E+06	1,60E-07
810	4,05E+04	4,50E+06	2,22E-07	4,78E+04	5,31E+06	1,88E-07	1,28E+05	1,42E+07	7,06E-08	5,43E+04	6,04E+06	1,66E-07
900	4,00E+04	4,45E+06	2,25E-07	4,61E+04	5,12E+06	1,95E-07						
990	3,97E+04	4,41E+06	2,27E-07	4,55E+04	5,05E+06	1,98E-07						
1080	4,03E+04	4,48E+06	2,23E-07	4,45E+04	4,94E+06	2,02E-07						
1170	3,99E+04	4,44E+06	2,25E-07	4,34E+04	4,83E+06	2,07E-07						
1260	3,97E+04	4,42E+06	2,26E-07	4,24E+04	4,72E+06	2,12E-07						
1349	3,95E+04	4,39E+06	2,28E-07	4,04E+04	4,49E+06	2,23E-07						
1439	4,01E+04	4,46E+06	2,24E-07	3,70E+04	4,11E+06	2,43E-07						
1529	3,98E+04	4,42E+06	2,26E-07	3,29E+04	3,65E+06	2,74E-07						
1619	3,96E+04	4,41E+06	2,27E-07	2,60E+04	2,89E+06	3,46E-07						
1709	3,94E+04	4,37E+06	2,29E-07	8,59E+03	9,55E+05	1,05E-06						
1799	3,89E+04	4,32E+06	2,31E-07	1,63E+04	1,81E+06	5,52E-07						
1889	3,90E+04	4,34E+06	2,31E-07	2,29E+04	2,55E+06	3,93E-07						

Tabela 4.4: Medidas elétricas das amostras de acordo com a carga mecânica aplicada. Fonte: Autor, 2018.

A Figura 4.13 mostra a relação entre a condutividade elétrica e a carga de compressão aplicada na amostra. As amostras de referência apresentaram valores de condutividade na ordem de 2×10^{-7} s/cm permanecendo praticamente constante com o aumento da carga aplicada. Por outro lado, a adição do lodo, tende a reduzir o valor da condutividade para aproximadamente $4,9 \times 10^{-8}$ s/cm para as amostras contendo 15 % de lodo. Com aplicação de pressão, a condutividade tende a aumentar chegando a valores próximos da amostra de referência após aplicação de pressão de 1350 KPa.

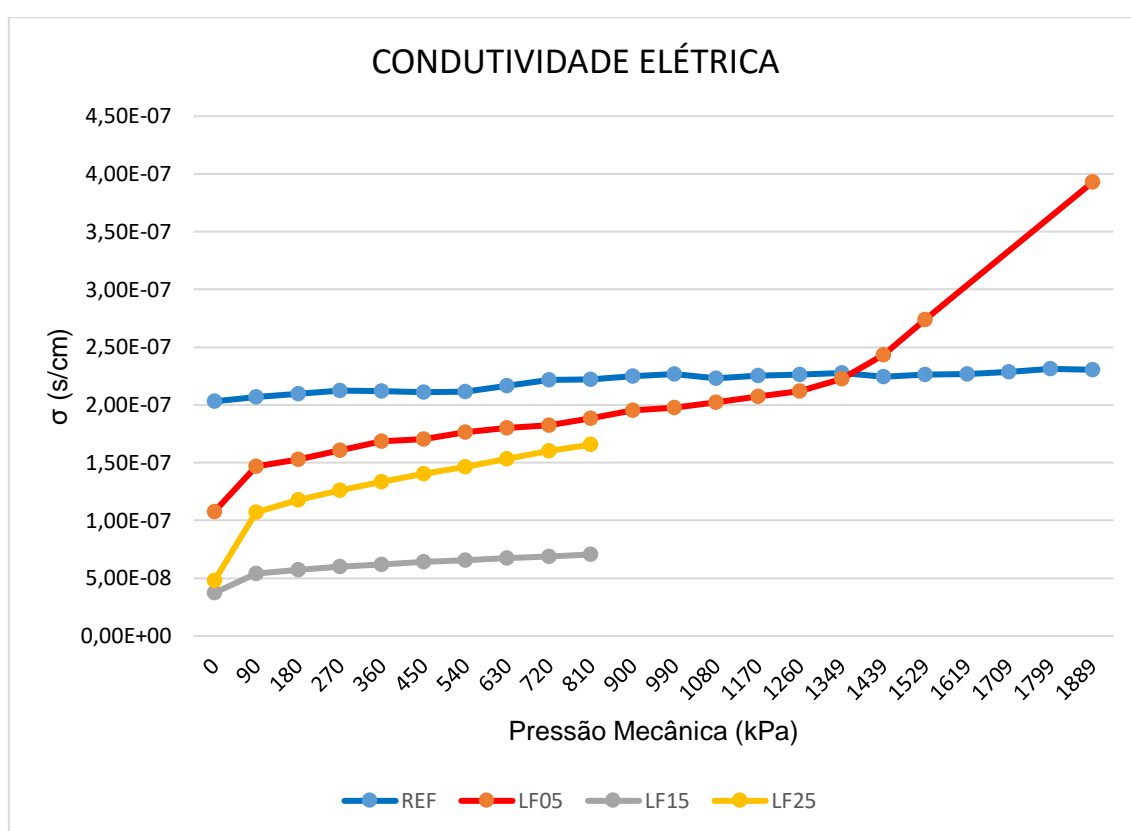


Figura 4.13: Condutividade elétrica das amostras em relação a pressão mecânica. Fonte: Autor, 2018.

Na Figura 4.14 apresenta-se o gráfico da relação entre o potencial elétrico das amostras e a pressão mecânica aplicada. O potencial elétrico das amostras pode ser avaliado pela inclinação das curvas potência elétrica versus pressão mecânica, em geral as amostras apresentam um comportamento linear na faixa de valores

analisada, na amostra com 5% de lodo que em aproximadamente 1260 kPa tem uma mudança na variação de seu potencial elétrico.

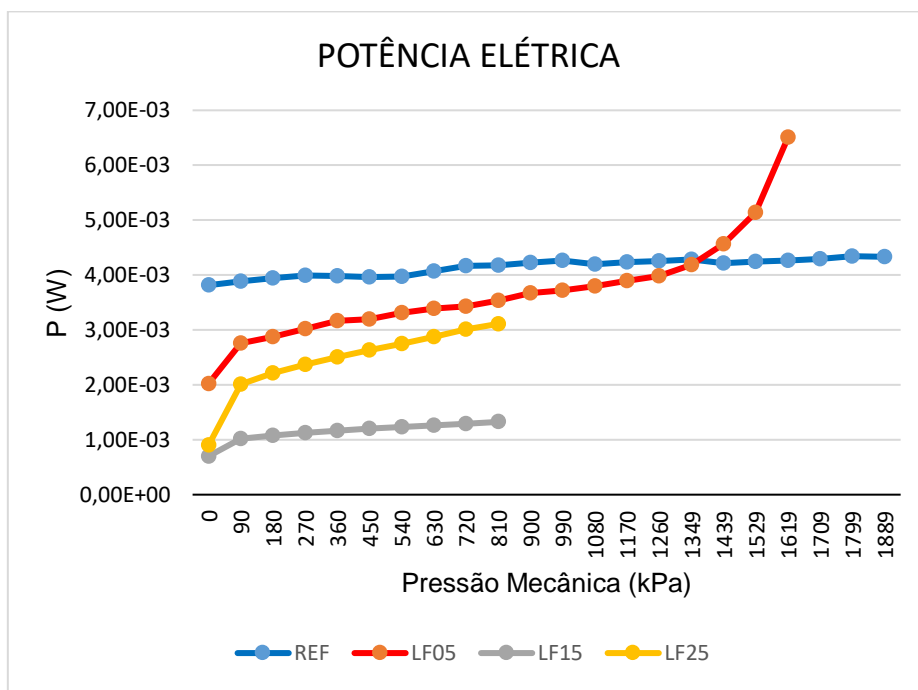


Figura 4.14: Potência elétrica das amostras em relação a pressão mecânica. Fonte: Autor, 2018.

Para comparar e avaliar o comportamento linear do potencial elétrico das amostras foi restringido aos valores de pressão mecânica entre 90 e 900 kPa. O gráfico da Figura 4.15 demonstra as curvas de potência elétrica e sua linear equivalente, bem como as equações.

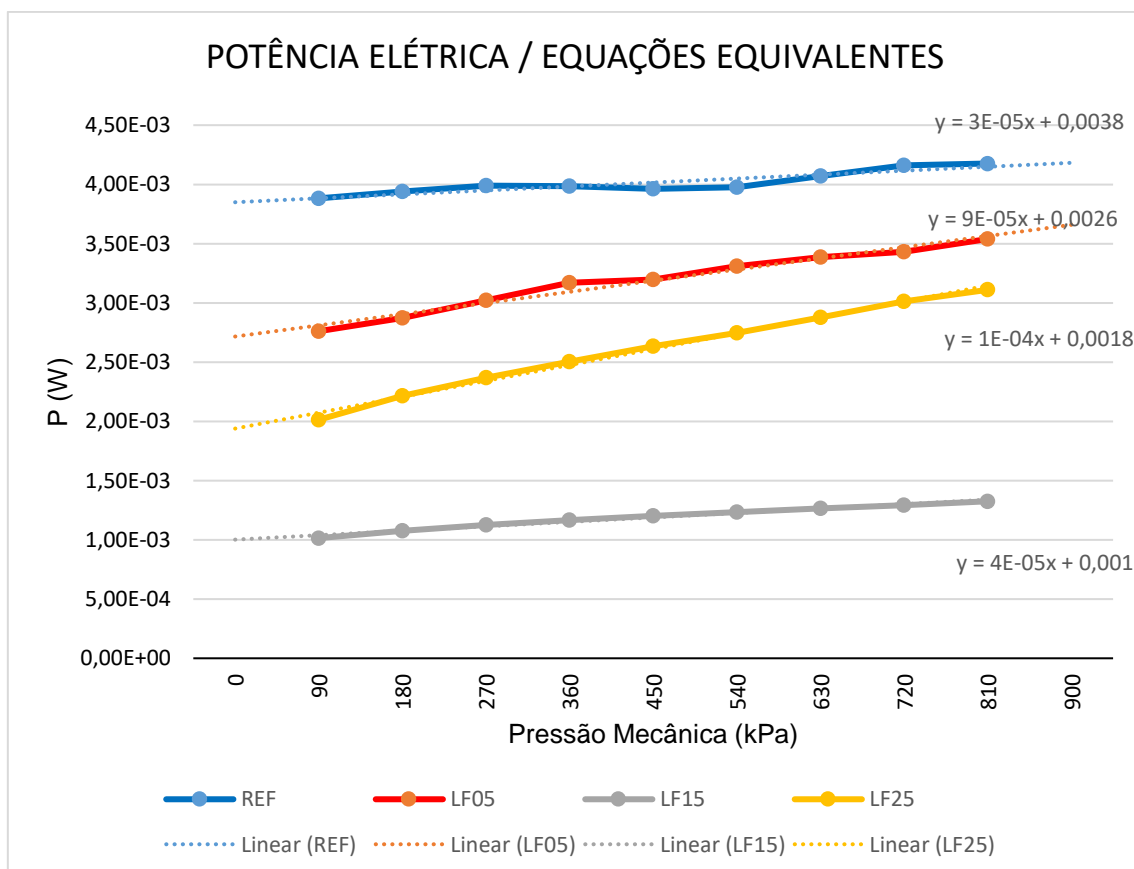


Figura 4.15: Potência elétrica/ Equação linear equivalente. Fonte: Autor, 2018.

As equações lineares são representadas por uma constante multiplicando a incógnita, nesse caso o x. A Tabela 4.5 descreve as equações de cada amostra e sua constante, que chamamos nesse caso de fator potencial elétrico, pois quando maior seu valor, mais alta será a potência elétrica gerada pelo corpo de prova analisado.

Amostra	Equação	Fator Potencial Elétrico
REF	$Y = 3 \times 10^{-5} x + 0,0038$	3×10^{-5}
LF05	$Y = 9 \times 10^{-5} x + 0,0026$	9×10^{-5}
LF15	$Y = 4 \times 10^{-5} x + 0,001$	4×10^{-5}
LF25	$Y = 1 \times 10^{-4} x + 0,0018$	1×10^{-4}

Tabela 4.5: Equações potência elétrica. Fonte: Autor, 2018.

A amostra sem presença de resíduo apresentou menor potencial de geração de energia elétrica. O corpo de prova com 5% de lodo teve um bom desempenho em seus ensaios, obteve um elevado potencial elétrico mantendo seu comportamento elástico durante a compressão mecânica das amostras.

A amostra com 25% de lodo representou um maior potencial elétrico em seu ensaio, porém o corpo de prova demonstrou comportamento mecânico frágil e uma alta porosidade próxima a 30%. O corpo de prova com 15% de resíduo teve resultados fora do esperado no ensaio elétrico apresentando baixo potencial elétrico em relação as outras amostras de lodo. Como citado anteriormente as amostras com 15 e 25% de lodo obtiveram um comportamento frágil e não elástico no ensaio de compressão a pressões acima de 900 kPa, devido a concentração de resíduo pode ter ocorrido a formação de fissuras no corpo de prova durante o processo de cura o que afetou o desempenho elétrico.

5. CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível estudar o comportamento piezoresistivo dos compósitos cimentícios com e sem resíduo relacionando com a microestrutura e propriedades físicas.

A presença de resíduos de lodo tende a aumentar a porosidade e absorção de água das amostras, reduzindo a densidade aparente e consequentemente a resistência mecânica. Resultado este evidenciado nas microestruturas obtidas por MEV, onde foi nitidamente observado a presença de maior porosidade quanto maior adição de resíduo.

A resistência e resistividade elétrica tendem a aumentar com a adição do resíduo e tende a diminuir quanto maior a pressão de compressão. A amostra contendo 5 % de resíduo passou de $9,26 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ resistividade elétrica sem pressão para $5,12 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ a 900 KPa. Em altas pressões acima de 900 KPa os valores tendem a reduzir a valores próximos aos observados nas amostras sem resíduo.

Verificou-se que as amostras contendo resíduo demonstraram um comportamento piezoresistivo em função da tensão de compressão mais acentuado. A piezoresistividade tendeu ao um comportamento linear durante a compressão, conforme esperado e observado em trabalhos semelhantes.

A condutividade da amostra contendo 25% de lodo obteve uma curva com inclinação notável diante das demais, em carregamentos inferiores a 900 KPa, devido a maior quantidade de Ferro presente nos corpos de prova. Porém, a sua baixa resistência mecânica e elevada porosidade diante das demais amostras não permitiu a análise em maiores pressões.

Se observa que as amostras com resíduo apresentam maior potencial de geração de energia, que faz com que a piezoresistividade seja mais notável. O corpo de prova com maior concentração de lodo apresentou maior potencial elétrico, porém tem sua estrutura frágil e com alta porosidade. Dentre as amostras analisadas a que

possui 5% de resíduo foi a que demonstrou ser melhor resposta piezoresistiva, resultado proveniente de sua menor porosidade e maior resistência mecânica.

6.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Propor a variação das proporções das misturas;
- Realizar teste com cimento Portland diferentes do CPIV;
- Fabricar concreto, adicionando agregados graúdos avaliando as propriedades elétricas e mecânicas das amostras.
- Realizar medidas de piezoresistividade utilizando a técnica de espectroscopia de Impedância complexa.
- Realizar o teste de lixiviação ao longo do tempo para verificação da manutenção do resíduo no compósito cimentício.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico**. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6503: Rochas e Solos**. Rio de Janeiro. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para Concreto**. Rio de Janeiro. 2005.

ABREU, A. G.. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998. Dissertação de Mestrado (Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ASHBY, M F; JONES, D R H. **Engenharia de materiais volume ii: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto..** 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BILLIG, J. D.. **Compósitos Cimentícios Reforçados com Nanotubos de Carbono: Investigação das Propriedades Térmicas, Elétricas e Piezoresistivas**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BREHM, F.A.; KULAKOWSKI, M. P.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M.; PAMPANELLI, A. B. **Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil**. Ambiente Construído, v. 13, p. 15–27, 2013.

CALLISTER Jr, W. D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2002.

CHEN, B., Wu, K.R. and Yao, W.. **Piezoresistivity in Carbon Fiber Reinforced Cement Based Composites," Journal of Materials Science and Technology**, 20(6):746-750. 2004.

FERNANDES, B. A.. **Estudo das Propriedades Piezoresistivas de Compostos de Cimento com Adição de Polianilina e Nanotubos de Carbono**. 2016. Dissertação

de Mestrado (Departamento de Física)- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

GONÇALVES, R. D. C.. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – Um novo material para dosagens estruturais**. 2000. Dissertação de Mestrado (Escola de Engenharia)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

HAN, B.. OU, J.. **Embedded Piezoresistive Cement-based Stress/ Strain Sensor**. Sens Actuators A. Phys, vol. 138, 159-163, 2007.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese de Livre Docência – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18754: specifies methods for the determination of the apparent solid density, bulk density, apparent density and geometric bulk density of fine ceramics**, 2013

KAKIMOTO, L.C.. **Apostila Materiais Elétricos**. UEL, 2013.

KIM, H.. PAIK, I.. LEE, H.. **Improved Piezoresistive Sensitivity and Stability of CNT/ Cement Mortar Composites with Low Water-binder Ratio**. Composite Structures, vol. 116, 713-719, 2014.

LIU, X.. NIE, Z.. WU, S.. WANG, C.. **Self-monitoring Application of Conductive Asphalt Concrete Under Indirect Tensile Deformation**. Construction and Building Materials, 2015.

LIU, X.. WU, S.. **Research on the Conductive Asphalt Concrete's Piezoresistivity Effect and its Mechanism**. Construction and Building Materials, 2009.

LOAMRAT, K.. SAPPAKITTIPAKORUN, M.. SUKONTASUKKUL, P.. BANTHIA, N.. **Effect of Carbon Fiber and Graphite Powder on Resistivity of Cement-based Sensor Under Compression**. KMUNT: IJAST, vol. 7, 2014.

LÜBERK, A.. **Resistividade elétrica de concretos de cimento portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. 2008. Dissertação de Mestrado

(Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MANTOVANI, F. **Viabilidade do uso de lodo de fosfatização como pigmento em matriz de cimento Portland branco**. 2014. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil)- Unisinos, São Leopoldo. 2014.

MARTINS, I. R. F.. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduo de Borracha de Pneu. Dissertação de Mestrado**. Unesp, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. PINI. 1994.

MENEZES, V. S.. FERRONATO, D. N. L. SANTOS, E. M.. FREITEIRA, J. F. S.. **Estudo do Comportamento da Porosidade de pasta de cimento por Utrassom**. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Águas de Lindóias, 2016.

ROSA, D. W.. **Resistividade Elétrica de Concretos com Diferentes Teores de Escória de Alto Forno e Ativador Químico**. Dissertação de Mestrado. UFSM, 2005.

SATO, N. M. N.. **Análise da Porosidade e de Propriedade de Transporte de Massa em Concretos**. Tese. USP, 1998.

SHAKEFORD, J. F.. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 5th ed. Prentice Hall. New Jersey, 2000.